

# LA ESFERA DE LA VIDA:

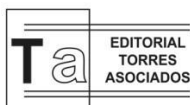
DE LA EPISTEMOLOGÍA AMBIENTAL  
A LA INTER Y TRANSDISCIPLINARIEDAD.  
TÓPICOS EN CIENCIAS AMBIENTALES

Elia Alejandra Teutli Sequeira · Vanessa González Hinojosa  
(Coordinadoras)



**La esfera de la vida:  
De la epistemología ambiental  
a la inter y transdisciplinariedad.  
Tópicos en Ciencias Ambientales**

Elia Alejandra Teutli Sequeira / Vanessa González Hinojosa  
(Coordinadoras)



*La esfera de la vida: De la epistemología ambiental a la inter y transdisciplinariedad. Tópicos en Ciencias Ambientales*

Primera edición: 2023

ISBN: 978-607-8702-84-8

Agradecemos el apoyo de Itzel Herrera Villanueva en el diseño de la Portada y Contraportada.

© Elia Alejandra Teutli Sequeira y Vanessa González Hinojosa (Coordinadoras)

© Editorial Torres Asociados

Coras, manzana 110, lote 4, int. 3, Col. Ajusco

Delegación Coyoacán, 04300, México, D. F.

Tels. 5556107129 y 5575926161

editorialtorres@prodigy.net.mx

La presente obra fue sometida a dictamen –de cada capítulo y del libro en su totalidad– en el sistema de pares ciegos externos por universidades nacionales acorde con rigurosos criterios de calidad académica.

El contenido total de esta publicación es responsabilidad de los(as) autores(as).

Esta publicación no puede reproducirse toda o en partes –incluido el diseño de la cubierta–, para fines comerciales, sin la previa autorización escrita de las titulares de los derechos –Coordinadoras y Editorial–.

IMPRESO EN MÉXICO

*PRINTED IN MEXICO*

# ÍNDICE

**AGRADECIMIENTOS..... 7**

**INTRODUCCIÓN.....9**

## **PRÓLOGO**

*Emilio Gerardo Arriaga Álvarez..... 15*

## **QUÍMICA SUSTENTABLE**

APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS ACOPLADOS  
DDB-O<sub>3</sub> Y DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN LA DEGRADACIÓN DE  
NONILFENOL

*Mayra Rodríguez Peña*  
*Carlos Eduardo Barrera Díaz*  
*Bernardo Antonio Frontana Uribe*  
*Gabriela Roa Morales..... 31*

OXIDACIÓN DE FENOLFTALEÍNA POR UN SISTEMA  
ELECTROQUÍMICO ACOPLADO CON OZONO

*Violeta García Orozco*  
*Gabriela Roa Morales*  
*Ivonne Linares Hernández*  
*Carlos Barrera Díaz*  
*Reyna Natividad Rangel..... 79*

SEDIMENTACIÓN AVANZADA DE AGUAS RESIDUALES  
MUNICIPALES A TRAVÉS DE LA ELECTRODISOLUCIÓN  
DE IONES DE COBRE

*Montserrat Ballesteros Balbuena*  
*Patricia Balderas Hernández*  
*Gabriela Roa Morales*  
*Carlos Eduardo Barrera Díaz..... 123*

## **FITORREMEDIACIÓN**

SALIX BABYLONICA PARA APLICACIONES EN  
FITORREMEDIACIÓN: ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS  
BIOLÓGICAS EN POBLACIONES DEL VALLE DE TOLUCA

*Griselda Cruz Ruiz*  
*Moisés Tejocote Pérez*  
*Patricia Balderas Hernández*  
*Gabriela Roa Morales*..... 155

## **AGRICULTURA SUSTENTABLE**

ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE *PLEUROTUS OSTREATUS*  
DESDE UN ENFOQUE SUSTENTABLE

*María Dolores Medina Miranda*  
*Edith Erielia Gutiérrez Segura*  
*Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo*  
*Miguel Ángel Balderas Plata* ..... 185

CARBONO NEGRO EN LOS SUELOS FORESTALES: UNA  
REVISIÓN

*Isabel Reyes Avilés*  
*Rodolfo Serrato Cuevas*  
*Francisco Gutiérrez Rodríguez*  
*Andrés González Huerta* ..... 217

TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PORCINOS Y  
MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL: UNA REVISIÓN

*Sonia López Fernández*  
*Rodolfo Serrato Cuevas*  
*Gabriela Roa Morales*  
*Araceli Amaya Chávez*..... 261

## **GEOGRAFÍA Y PLANEACIÓN URBANA PARA LA SUSTENTABILIDAD**

SISTEMATIZACIÓN TEÓRICA PARA EL ESTUDIO  
INTEGRAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS. EL  
CASO DEL PARQUE OTOMÍ-MEXICA DEL ESTADO DE  
MÉXICO

<i>Daniel Villegas Martínez</i>	
<i>Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo</i>	
<i>William Gómez Demetrio</i>	
<i>Luis Miguel Espinosa Rodríguez</i> .....	309

METABOLISMO URBANO COMO PROPUESTA  
ALTERNATIVA A LA PROBLEMÁTICA ECOLÓGICA DE  
LAS CIUDADES

<i>Dainiz Noray Montoya García</i>	
<i>Salvador Adame Martínez</i>	
<i>Edel Cadena Vargas</i>	
<i>Verónica Martínez Miranda</i> .....	357

**ECOLOGÍA POLÍTICA**

EL DISCURSO DE LA ESCASEZ: UNA CRÍTICA DESDE LA  
ECOLOGÍA POLÍTICA PARA REPENSAR LA CRISIS DEL  
AGUA EN LAS CIUDADES

<i>Aracely Rojas López</i>	
<i>Lilia Zizumbo Villarreal</i>	
<i>Emilio Gerardo Arriaga Álvarez</i> .....	389

EL CONSUMO DE AGUA EMBOTELLADA EN MÉXICO,  
UNA PROBLEMATIZACIÓN

<i>Vanessa González Hinojosa</i>	
<i>Lilia Zizumbo Villarreal</i>	
<i>Emilio Gerardo Arriaga Álvarez</i>	
<i>Verónica Martínez Miranda</i> .....	433

**DISCIPLINAS EMERGENTES**

**DEGRADACIÓN AMBIENTAL Y SUSTENTABILIDAD**

HERRAMIENTAS NO DESTRUCTIVAS PARA EL ESTUDIO  
DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL PATRIMONIO  
PREHISPÁNICO: CASO OXPÉMUL, CAMPECHE

<i>Yolanda Espinosa Morales</i>	
<i>Javier Reyes Trujeque</i>	

<i>Rosario Domínguez Carrasco</i>	
<i>Verónica Martínez Miranda</i> .....	493

### **ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO**

#### VULNERABILIDAD DE GÉNERO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: LOS RETOS DE MÉXICO ANTE LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

<i>Ana Luz Quintanilla Montoya</i>	
<i>Rocío Sinaid Álvarez Cervantes</i>	
<i>Evelyn Rodríguez Morrill</i> .....	537

## **AGRADECIMIENTOS**

En memoria de la Dra. María Teresa Olguín Gutiérrez, por enriquecer esta obra con su invaluable trayectoria académica.

A la Dra. Erika Cruz Coria, por su considerable contribución en el fortalecimiento de este escrito.

A las Dras. Verónica Martínez Miranda y Lilia Zizumbo Villarreal, por su gran determinación, voluntad y compromiso en la publicación de este manuscrito.

Al Dr. Juan Carlos Sánchez Meza, por su excepcional apoyo en la vinculación con el Posgrado en Ciencias Ambientales promovido por la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).

A los(as) autores(as) y coautores(as), por compartirnos su conocimiento y por la paciencia que tuvieron a lo largo de este proceso. Además de sus amables aportaciones para el financiamiento de esta obra.

Y a todos(as) quienes hicieron posible la realización de este libro colectivo.





# INTRODUCCIÓN

Ante la inminente crisis civilizatoria que experimentamos en el mundo, es urgente abordar algunas de las problemáticas<sup>1</sup> que en materia ambiental nos aquejan como humanidad, a la par de formular posibles alternativas ante estos desafíos. Es por ello que la propuesta de esta obra se concentra en buscar un diálogo de saberes entre diferentes pensamientos y lenguajes que intentan dar respuesta a dichos planteamientos, además de repensar posibles formas de abordaje teórico y metodológico que la construcción del conocimiento ambiental precisa para su estudio; poniendo en el centro a nuestro planeta Tierra como sagrada esfera de la vida que nos sustenta en cada momento.

Por lo que este escrito es un esfuerzo colectivo inter y transdisciplinario del resultado de investigaciones generadas en el Posgrado de Ciencias Ambientales adscrito a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Es importante mencionar que el proceso para la elaboración de este libro se inició entre los años de 2018 y 2019, por lo mismo, los capítulos se retoman de estudios efectuados en ese periodo de tiempo. Sin embargo, por motivos extraordinarios y relacionados con la crisis sanitaria que se experimentó se detuvo la conformación de

---

<sup>1</sup>Es importante mencionar que los capítulos recuperados en este escrito presentan tres modalidades: Divulgación científica, Investigación y Revisión. Por lo mismo, se muestran variaciones en cuanto a su delimitación espacial, temporal y teórica.

la obra, siendo posible su publicación hasta el año 2023.

La conformación del libro se enfoca en seis exhaustivos apartados, los cuales parten desde la Química Sustentable, Fitorremediación, Agricultura Sustentable, Geografía y Planeación urbana para la sustentabilidad, Ecología Política, hasta las Disciplinas emergentes. Con el acompañamiento inicial de un Prólogo que muestra la relación existente entre la diversidad de pensamientos que la propia epistemología ambiental requiere –desde la inter y transdisciplinariedad–; además de precisar cuestionamientos relevantes entre nuestra relación con la naturaleza, y las subjetividades que nos atraviesan como seres humanos.

Dentro de las grandes interrogantes y algunos elementos teórico-metodológicos que se abordan en este manuscrito, enfatizamos sobre la creciente contaminación del agua, principalmente, por las descargas municipales e industriales que van a parar directamente en nuestros cuerpos de agua. Ante esta severa problemática, se presentan tecnologías de punta, que a través de los procesos acoplados –mediante el tratamiento de la Oxidación avanzada– remueven el nonilfenol, compuesto tóxico que puede devenir en graves enfermedades para la población; demostrando a su vez optimización en cuanto al tiempo y los costos de su operación. Aunado a esta tecnología, se presenta el proceso de electrooxidación de la fenoltaleína, medicamento difícil de remover en el agua residual. Asimismo, la electrocoagulación enfocada en el tratamiento de

sedimentación avanzada conlleva una alta eficiencia en cuanto a mejorar la calidad del agua, en particular de las descargas municipales.

A su vez, la Fitorremediación es una alternativa ambiental y de bajo costo, que, mediante la utilización de los sauces, remueve la contaminación del suelo y el agua. A la par de estas tecnologías innovadoras, se propone el proceso de producción artesanal de un hongo que, mediante la Agroecología, fomenta la armonización de las dimensiones sociales, ecológicas y económicas que precisan los estudios sustentables en nuestro país. Además de resaltar la importancia del carbono negro en nuestros suelos –procedente de los incendios forestales– como estrategia de mitigación del cambio climático por su capacidad de secuestrar el carbono a largo plazo. Aunado a este tipo de estrategias, se presenta la digestión anaerobia, el compostaje aeróbico y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental en los sistemas de residuos orgánicos porcinos, los cuales por su naturaleza generan considerables emisiones de gases de efecto invernadero, así como contaminación del agua y suelo.

Por otra parte, podemos resaltar la utilización de herramientas como la teoría de sistemas y el pensamiento complejo para abordar problemáticas como la conservación de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), apoyadas por la legislación ambiental mexicana. Todo ello con el planteamiento de revisiones teóricas y posibles acercamientos en su abordaje. Asimismo, el metabolismo urbano,

da cuenta de la *destrucción creativa* que experimentaron las zonas rurales con los procesos crecientes de urbanización que la revolución industrial necesitaba para reconfigurar el paisaje, a uno más acorde con el proyecto modernizador. Ante esta disyuntiva, el enfoque sistémico es de suma importancia para abordar esta suerte de desafíos, en conjunto con el metabolismo social que permite evidenciar cómo se están rebasando los límites biofísicos de nuestro planeta.

El pensamiento crítico es esencial en el abordaje de ciertos escritos que retoman a la Ecología Política como su base teórica metodológica, para poder repensar el contenido y el vacío de los discursos con relación a la escasez del agua, ¿cómo enfrentar la crisis hídrica cuando los procesos de desigualdad en la distribución del vital líquido son tan evidentes? Es por ello fundamental desvelar las contradicciones que precisa el sistema económico político que nos rige. Ante la privatización del agua, ¿existe algún contradiscurso que pueda coadyuvar a una distribución equitativa en los asuntos del vital líquido? En esta misma línea de análisis cuestionar las formas en que actualmente consumimos el agua, es esencial, para dar cuenta sobre las implicaciones que conlleva el consumo del agua embotellada en nuestro país. Al ser el principal consumidor de este producto a nivel mundial por persona. Por lo cual se propone un marco teórico referencial que posibilite el abordaje de este objeto de estudio, como línea de investigación incipiente en México.

Las disciplinas emergentes que conforman esta obra son de gran importancia para un entendimiento holístico e integral de las problemáticas ambientales. Por un lado, se rescatan las técnicas analíticas para la recuperación del patrimonio cultural, que por la degradación ambiental experimentan ciertos vestigios prehispanicos pertenecientes a la civilización maya. Y por el otro, el inminente cambio climático, que desde el periodo industrial se agudizó severamente, pone no sólo de manifiesto sus impactos ambientales, sino también los factores socioeconómicos y culturales de la desigualdad que el sistema capitalista precisa para su reproducción; evidenciando la vulnerabilidad que las mujeres experimentan en condiciones de pobreza y subordinación ante el fenómeno del calentamiento global. Para lo cual se requieren de medidas de mitigación y adaptación que reivindiquen los derechos humanos de las mismas.

Esta pequeña pincelada del contenido que abarca la presente obra da cuenta de la importancia de estudiar las ciencias ambientales –desde una perspectiva inter y transdisciplinaria–, ante la crisis ambiental y sanitaria que actualmente padecemos como especie. ¿Cómo sobrevivir ante un sistema que pareciera propiciar su propia autodestrucción?, ¿qué podemos hacer desde nuestra vida cotidiana para aminorar dicho exterminio? Estas interrogantes esperamos puedan ser respondidas y ampliadas con las reflexiones que deseamos fomentar en este libro,

y con los cuestionamientos que seguramente les surgirán a partir de su lectura.

*Elia Alejandra Teutli Sequeira*<sup>2</sup>.

*Vanessa González Hinojosa*<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Es Doctora en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Actualmente, es Profesora e Investigadora por México CONAHCYT-UAEMéx en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua (IITCA). Su línea de investigación se enfoca en la Optimización de tratamientos de aguas residuales y control de la contaminación, con énfasis en adsorción y procesos de oxidación avanzada. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 1 e integrante de la Comisión Académica del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Ambientales. Correo electrónico: aleteutlis@gmail.com

<sup>3</sup> Es Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Actualmente, es Catedrática COMECYT-UAEMéx en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua (IITCA). Su línea de investigación versa sobre el estudio del agua embotellada y de consumo humano, desde una perspectiva crítica insertada en un campo inter y transdisciplinario. Con áreas de interés afines a las ciencias ambientales como los Tratamientos para mejorar la calidad del agua potable, la Ecología Política, El Biopoder, el Desarrollo Sustentable, la Historia ambiental, la Epistemología ambiental, la Educación ambiental, entre otras. Colabora activamente en la red de investigación: “Red Temática de Estudios Críticos del Agua”. Correo electrónico: vangohi13@gmail.com

# PRÓLOGO

Por: Emilio Gerardo Arriaga Álvarez

*“La vida en la naturaleza es,  
al mismo tiempo,  
la esfera de lo contingente.”  
(Hegel, 2019, p. 304).*

## **Contingencia y vida**

La vida de los seres humanos está en la esfera de lo contingente. Lo ha sido, lo es y lo será. La gran mayoría de los esfuerzos humanos para ejercer el control y el dominio sobre la naturaleza ha tenido costos; la mayoría de ellos no pueden considerarse menores. Y a pesar de estas afirmaciones, más allá de que alguien solicite evidencias al respecto, dichas solicitudes provienen de nuestro engreimiento, teñido por un optimismo desmedido por la ciencia institucionalizada, sus múltiples aplicaciones y porque, seguimos confiando demasiado en la idea de progreso. Esta confianza inmoderada por las formas de aplicabilidad e institucionalización de la ciencia, pueden formar parte de las distintas razones de la crisis ambiental que sufre nuestro planeta. Sabemos entonces, que dicha crisis, es resultado de las diferentes prácticas, en donde lo humano y lo “natural” se declaran como diferentes. La cuestión es: ¿Esto es así?



En este orden de ideas, enunciamos nuestra pregunta inicial ¿Es “eso” que llamamos “naturaleza” algo externo a nosotros? Porque desde hace siglos, el comportamiento humano en general, parece sobreponer una visión de lo existente en donde lo humano se antepone, incluso a las reglas de eso que llamamos naturaleza. Igualmente, “eso” que llamamos vida, parece también estar envuelto en una serie de mitos y generalizaciones, en donde la idea parece carecer de sentido por la erosión de sus significados.

Estos argumentos, por más vagos que parezcan, nos permiten establecer soportes para abordar un conjunto de temáticas ubicadas en el margen de los estudios sobre la sustentabilidad, así como sus manifestaciones en el uso cotidiano de la humanidad. Para ello, se plantean dos puntos de partida, uno trascendental y otro epistemológico. Sobre los capítulos que conforman esta obra, como ya se mencionó, se trata de investigaciones originales trabajadas por expertos en la materia, académicos y estudiantes del posgrado de Ciencias Ambientales con sede en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).

En una primera hojeada, la obra puede entenderse como un trabajo inter-disciplinario. Sin embargo, al pensarlo de una manera no convencional, puede entenderse como un ejercicio de trans-disciplinarietà. Enseguida se plantean los argumentos en los que descansa este juicio.

## **La esfera de la vida y su espíritu: una visión más allá de la interdisciplinariedad**

Las primeras secciones, que se formulan como “Química sustentable” y “Fitorremediación”, contienen cuatro análisis. Se trata de investigaciones en el ámbito de la química aplicada cuyo “espíritu”<sup>4</sup> se afirma, en los principios de la idea de sustentabilidad; una idea particularmente frágil, pero ideológica y políticamente correcta, que en este pequeño espacio es difícil discutir. Baste sugerir que se trata de una problematización<sup>5</sup> con amplio espacio para su crítica. Centrándonos en el referido espíritu de los escritos citados, tenemos a la vista, que en todos los documentos se manifiesta de

---

<sup>4</sup> El concepto de espíritu es entendido aquí cómo, “... el entendimiento (...) en general; éste es el significado predominante en la filosofía moderna y contemporánea y en el lenguaje común. Para Kant, por ejemplo, “Un espíritu es un ser que tiene la razón. No es un don milagroso “(...) ver espíritu, ya que todo el que ve hombres, ve seres que tienen razón (Abbagnano Ob. Cit.)”. Por otra parte, podemos decir que, “(...) espíritu según Hegel se duplica (...) se hace reflexionando sobre sí mismo (...) (Ver: Gutiérrez Pozo)”.

<sup>5</sup> “Problematización no quiere decir representación de un objeto pre-existente, ni tampoco creación por medio del discurso de un objeto que no existe. Es el conjunto de las prácticas discursivas y no discursivas lo que hace entrar a algo en el juego de lo verdadero y de lo falso y lo constituye como objeto de pensamiento (ya sea bajo la forma de reflexión moral, del conocimiento científico, de análisis político, etc.)” (Foucault, 1991, pp. 231-232).

manera clara, la preocupación por el tema de la vida, no como un ámbito separado de la realidad, sino como parte de ella y como resultado de actos derivados de un ordenamiento que demanda la mejora humana, como es el caso de las diversas formas de contaminación del agua y sus correspondientes tratamientos para la mejora de este elemento que representa a la vida.

Estas inquietudes se encuentran también en el apartado titulado “Agricultura sustentable”, integrado por tres investigaciones. ¿No resulta curioso que uno de los problemas humanos siempre acuciantes sea el de la alimentación en una época en la cual es posible -al menos técnicamente- superar el problema? No es este un asunto menor.

Es importante entonces, resaltar la preocupación final en estos trabajos, los cuales, no refieren directamente principios de eficiencia o sobre la productividad *per se*. En todo caso, se asume el valor de los alimentos como una posibilidad para el mantenimiento de la vida. Por definición, es un hecho vinculado a cuestiones vitales, es decir, de autopreservación y sustento de la vida. Esto, a través de recursos agroecológicos y orgánicos que provee la naturaleza como es el hongo *Pleurotus ostreatus*; el carbono negro, visto desde una perspectiva amplia y analizado a detalle, a fin de identificar las ventajas positivas que puede proveer al sistema natural, así

como los efectos de los residuos orgánicos porcinos y su impacto en el “medio ambiente”<sup>6</sup>.

Con respecto al apartado que se presenta bajo el título “Geografía y planeación urbana para la sustentabilidad”, integrada por dos indagaciones. Se abordan problemáticas gestadas en la modernidad civilizatoria mundial: el problema de las ciudades. Todas ellas, diferenciadas de una u otra forma, fuera de la imagen de “la naturaleza” y como un “medio ambiente” diferente de la naturaleza. La alteración de este “medio ambiente” ocurre de formas distintas, ya sea para el logro del confort y/o para la racionalización en el uso de los diferentes recursos creados y utilizados para el control de estos mismos recursos. Una paradoja implícita. Aquí, nos acercamos al ejercicio moderno de las consideraciones reificadoras<sup>7</sup>, de aquello que se entiende por “recursos”. Los materiales y los humanos. Los inertes, expresados y creados dentro la tabla periódica de los elementos y del ámbito “externo” de

---

<sup>6</sup> Si bien este término proviene de un error ortográfico –que tiende a ser un pleonasma– originado desde la Cumbre de Estocolmo de 1972, se retoma este concepto por la popularización que su alcance tiene hasta nuestros días.

<sup>7</sup> Desde la Filosofía es un término empleado, que significa etimológicamente, 'convertir algo en cosa', 'cosificar'. En cierto modo, puede entenderse como un proceso de transformación de representaciones mentales en cosas, o de sujetos en cosas. En los procesos de reificación, las nociones abstractas son concebidas como objetos (Rosental y Iudin, 2013).

la “naturaleza”, diferenciándose de lo humano. Por otra parte, los recursos que tienen voluntad propia, al menos en sus posibilidades reales/formales, los seres humanos. He aquí una expresión de convivencia paradójica.

Las argumentaciones en el apartado que nos ocupa transcurren dentro de la forma vital, en la que la civilización moderna, ha dictaminado como la mejor manera de vivir la vida para los humanos: en la ciudad. Estos hechos ocurren bajo una premisa, de que la vida como tal, es necesario retrocederla más cercanamente con ese ámbito, que parece ahora estar alejada de lo natural. Esto implicaría nuevamente, una serie de reflexiones llenas de cuestiones técnicas, pero sintetizadas en el hecho de que las actividades humanas han ido demasiado lejos en su optimismo técnico y científico. Y tal vez, en una forma elemental de conclusión general, respecto de la necesidad de reivindicar la idea de vida; no sólo humana, sino más, de la vida en general.

Por su parte, el término “Planeación urbana sustentable” recupera aspectos planteados en otros escritos, como es el tema de la ciudad, la búsqueda se centra en alcanzar un enfoque sustentable. Sin embargo, el interés va hacia la noción de *metabolismo urbano*, planteada con el fin de examinar el balance entre la materia y la energía que se requiere para el manejo de una ciudad, sin exceder la

vitalidad, que los ecosistemas son capaces de proveer de forma natural.

En lo que concierne con el apartado “Ecología política”, integrado por dos investigaciones. En ambos escritos se reitera un espíritu reflexivo en torno a la vida, a lo vital, como planteamiento no sólo técnico-científico o de entes inertes, sino de lo socio-político-cultural; como constitutivo ontológico de lo humano. El intuitivo reflejo del análisis se observa en la energía que nos provee el agua. ¿Qué no decir acerca del agua? La imperativa insistencia sobre el ineludible trabajo cotidiano para la protección de la vida y concluir que eso que llamamos “medio ambiente” es un espacio irremplazable.

Dos estudios cierran la obra, cada uno corresponde a la “Degradación ambiental y sustentabilidad”; y a la “Adaptación al cambio climático”. Más allá de las posibles desviaciones que se pudiesen originar con un simple vistazo, el espíritu reflexivo permanece. Son problematizaciones que se mantienen sobre el dilema de la vida; de sus posibilidades y sus probabilidades. También de las posibilidades de tener acceso a la reconstrucción de herencias históricas que se destruyen como consecuencia de la polución y no solamente por el paso del tiempo. Y ni hablar del problema del cambio climático, en donde el llamado es a la

adaptación, porque las soluciones reales afectarían las contabilidades de empresas y Estados Nacionales. No es factible, sólo probable. Y lo probable frecuentemente está fuera de convertirse en hecho si no se cuenta con las adecuadas condiciones.

## **De la epistemología ambiental a la transdisciplinariedad**

Una dimensión argumentativa, que hace a esta obra algo verdaderamente homogéneo, se fundamenta en el hecho de que los trabajos mantienen acoplamiento a partir su forma general de creación de conocimiento, de su epistemología, entendida como “(La ...) Teoría de los fundamentos y métodos del conocimiento científico”.<sup>8</sup> Se trata entonces, de una forma de mirar el mundo que conocemos y compartimos y que, además nos retrata. Esta mirada es entonces, epistemológica porque:

(Implica)...una conciencia histórica y reflexiva de un mundo que me observa, me rodea y me absorbe por más que quiera objetivarlo desde mis propios argumentos racionales; es una epistemología donde se alberga el ser y quehacer de mi disciplina específica rodeada de otras tantas que la pueden complementar (transdisciplinariedad). De lo que se trata entonces, es de tener presente como modifico el mundo, pero

---

<sup>8</sup> Diccionario de la lengua española (2021). Edición del tricentenario. Recuperado de: <https://dle.rae.es/epistemología>

también, como soy modificado por él en el ciclo de mi espacio vital (Jaramillo Echeverri, 2003).

Se trata igualmente, de una forma de producción de conocimiento ecológico, porque asume su actividad desde la parte de la biología que proviene de la historia y la práctica natural; su mirada se posa en el estudio de las interacciones de los seres vivos con su “medio ambiente”, tanto vivo como no vivo. Además, comprende, entre sus facetas más importantes, las relacionadas con diversos tipos de poblaciones, incluida la humana. En este sentido, no existe actividad humana que no se relacione de manera directa o indirecta con la naturaleza. Las formas de manifestación de éstas son complejas, desde las necesidades de sobrevivencia en tiempos remotos, hasta los asentamientos humanos actuales, pasando por los usos y abusos en la explotación de los recursos naturales en el presente; por la destrucción de los ecosistemas y por las prácticas agrícolas e industriales basadas en un sistema mundial hiperproductivo. Hoy la relación humana con la naturaleza es cada vez más crítica, y su resultado puede deducirse ilusorio, porque deriva en un tipo de género humano posicionado como el aparente dominador de la naturaleza. De aquí se procede el problema de la vida.



Las investigaciones mencionadas, están centradas en una forma de producción de conocimiento que les marca coherencia por la forma en que plantean sus problematizaciones, a saber: desde una epistemología ambiental. Entonces: ¿Qué se entiende aquí por epistemología ambiental? Podemos hacer uso de esta definición que nos ofrece Enrique Leff, veamos:

Más que un proyecto con la finalidad de construir un nuevo objeto de conocimiento y de lograr una reintegración del saber, la epistemología ambiental es un trayecto para llegar a saber qué es el ambiente –ese extraño objeto del deseo de saber– que emerge del campo de exterminio al que fue expulsado por el *logocentrismo* teórico fuera del círculo de racionalidad de las ciencias (Leff, 2006, p. 5).

La Epistemología Ambiental pretende llegar a saber, a conocer, qué es eso que llamamos “ambiente”. No existe pretensión desde aquí, entrar en mayor detalle sobre esta problemática. Baste que se deje el asunto claramente planteado para que estas discusiones se hagan posibles. Lo que, si es necesario dejar en claro, es que los trabajos aquí presentados mantienen, de diferente manera ese “espíritu”, tal como se ha señalado. Y que este espíritu, implica igualmente, de acuerdo con Leff, una aventura humana, porque ¿acaso no es el ser

humano quien conoce o intenta conocer? Y ¿no es acaso el ser humano quien institucionaliza ese conocimiento? Entonces:

La epistemología ambiental es una aventura del conocimiento que busca el horizonte del saber, nunca el retorno a un origen de donde zarpa el ser humano con su carga de lenguaje; es el eterno retorno de una reflexión sobre lo ya pensado que navega por los mares de los saberes desterrados, arrojados al océano en la conquista de territorios epistémicos por el pensamiento metafísico y por la racionalidad científica (Leff, 2006, p. 5).

La explicación también podemos hacerla desde la América Latina, porque la mayoría de nuestras referencias las componen autores reseñados con y de pensamiento eurocéntrico, el cual mantiene la tendencia a la monopolización del conocimiento y de la ciencia moderna, desde ya hace demasiado tiempo. Sin embargo, en nuestro medio, hemos tenido la oportunidad para recuperar las diversas formas de producción y reproducción del conocimiento sobre la naturaleza y la sociedad y nos hemos permitido un mirar propio, para observarnos desde nosotros mismos -los latinoamericanos- desde una perspectiva no convencional y con el objeto de explicarnos las razones por las cuales resulta imperativo mirar, desde nuestra cultura y tradiciones,

eso que llamamos “medio ambiente” y su concatenación naturaleza-sociedad. Por tanto:

“La epistemología ambiental ya no se plantea tan sólo el problema de conocer a un mundo complejo, sino cómo el conocimiento genera la complejidad del mundo” (Leff, 2004, p. xi).

El mundo que deseamos conocer es un mundo fundamentalmente humano. Sin embargo, toda des-humanización deviene producto de la naturaleza humana. Sólo el ser humano tiene la capacidad de convertir-convertir/se en objeto. Es... ¿la naturaleza humana?

### **Una significación para la vida: un cierre desde la subjetividad**

Hasta aquí hemos hablado de la vida. Sin embargo, no está de más hacer alusión, desde la subjetividad (las humanidades) por supuesto, acercarnos a una idea, aunque sea mínima, de su significado. Para ello proponemos un acercamiento desde la filosofía de Giorgio Agamben (Ver). Una reflexión filosófica.

Agamben escribe sobre la cuestión de la amistad. Un tipo de relación, que está dentro de la naturaleza de los seres humanos desde siempre; está en nosotros, seres gregarios. Las preguntas transcurren y las reflexiones sobre los buenos y los malos amigos; sobre la heroicidad de los apóstoles,

Pedro y Pablo, porque ¿quiénes si no ellos, pueden ofrecer ejemplo de la “verdadera amistad”?

Pero el punto está marcado con relación a la vida, a nuestro “mundo de la vida”.<sup>9</sup> La pregunta específica es: ¿Qué es la vida? Apunta Agamben:

El que ve, siente (...) el ver; el que escucha, siente el escuchar, el que camina, siente el caminar, y así para todas las actividades hay algo que se siente que estamos ejerciéndolas, de modo que, si sentimos, nos sentimos sentir, y si pensamos, nos sentimos pensar, y esto es lo mismo que sentirse existir: existir significa en efecto sentir y pensar (Agamben, 2005).

¿Cómo sabemos que vivimos? Porque sentimos la vida. La vida es posible sentirla. Nos sentimos vivos. Y la vida es posible gracias a éste “sentir”. Dice Agamben:

“Sentir que vivimos es de por sí dulce, ya que la vida es por naturaleza un bien y es dulce sentir que un bien tal nos pertenece” (Agamben, 2005).

---

<sup>9</sup> Para Habermas (1999) el mundo de la vida se encuentra relacionado con las actitudes de las personas que manifiestan estabilidad en el tiempo, porque expresan la identificación con grupos en los que el sujeto encuentra conformación, seguridad y sentido. Las relaciones interpersonales cotidianas constituyen el medio en que las personas desarrollan sus vidas.

Y, para concluir:

“(…) ser: no tenemos de ello otra experiencia más que vivir” (Agamben Ob. Cit.).

Nuestro ser, lo que somos, se manifiesta en nuestra experiencia en y por la vida. Porque el que tiene conciencia de lo que vive y experimenta en ese sentirse vivo, puede tener conciencia del valor de estar vivo. Tal vez por ello Carl Sagan, definía a la conciencia humana, como el universo mirándose a sí mismo.

## Referencias

- Abbagnano, N. (1961). *Diccionario de filosofía*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Agamben, G. (25 de septiembre de 2005). La amistad. *La nación Line*. Recuperado de: [www.lanación.com.ar](http://www.lanación.com.ar).
- Foucault, M. (1991). El interés por la verdad. En *Saber y verdad* (pp. 231-232). Madrid: La Piqueta.
- Gutiérrez Pozo, A. (2021). La filosofía de Hegel o el espíritu en busca de definición. *Bajo Palabra*, (27), 389-410.
- Habermas, J. (1999). *Teoría de la Acción Comunicativa, Tomo I*. España: Editorial Taurus.
- Hegel, G.W.F. (2019). *Lecciones sobre la filosofía de la historia, I*. México: Fondo de Cultura Económica.

- Jaramillo Echeverri, L. G. (2003). ¿Qué es Epistemología?. *Cinta de Moebio*, (18), 1-6.
- Leff, E. (2004). *Racionalidad ambiental. La reapropiación social de la naturaleza*. México: Siglo XXI Editores.
- Leff, E. (2006). *Aventuras de la Epistemología Ambiental*. México: Siglo XXI Editores.
- Rosental, M. M. y Iudin, P. F. (2013). *Diccionario filosófico*. España: BRONTES.

# QUÍMICA SUSTENTABLE

---



# **APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS ACOPLADOS DDB-O<sub>3</sub> y DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> EN LA DEGRADACIÓN DE NONILFENOL**

Mayra Rodríguez Peña<sup>1</sup>, Carlos Eduardo Barrera  
Díaz<sup>2</sup>, Bernardo Antonio Frontana Uribe<sup>2</sup>  
y Gabriela Roa Morales<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado  
de México (UAEMéx). maay.06@hotmail.com

<sup>2</sup> Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable,  
UAEMéx-UNAM. cebarrerad@uaemex.mx,  
bafrontanau@uaemex.mx, gabyroam@gmail.com

## **1. Introducción**

### *1. Tratamiento de aguas residuales*

Hay dos propósitos principales en el tratamiento de aguas residuales. El primero y más común es el saneamiento del número principal posible de ciudades y pueblos, y la consecuente necesidad es la eliminación segura de las aguas residuales recolectadas en el medio ambiente después del tratamiento, cumpliendo al mismo tiempo con las regulaciones de eliminación. En términos ambientales, en la mayoría de las áreas áridas y



semiáridas, la cantidad principal de agua que fluye en un río podría tratarse como aguas residuales, especialmente en la parte inferior de la cuenca.

El segundo propósito, la reutilización de aguas residuales en su forma moderna, es un concepto relativamente nuevo en muchas comunidades del mundo, aunque se ha practicado de forma empírica durante más de 5000 años y es un fenómeno de facto en la naturaleza y en las cuencas fluviales. Se puede indicar que la reutilización de aguas residuales tratadas / recuperadas como prácticas basadas en la tecnología apareció durante el siglo XX, después de la implementación del tratamiento de aguas residuales a gran escala en todo el mundo desarrollado y también del aumento de la población que vive en las ciudades. En este momento hay grandes cantidades de aguas residuales tratadas disponibles para su reutilización, que se espera que aumenten en el futuro (Salgot *et al.*, 2018).

Aproximadamente el 99 % de las aguas residuales que entran en una planta de tratamiento de aguas residuales se vierten como agua tratada, el resto es una suspensión diluida de sólidos capturados a lo largo de los diversos tratamientos a los que se somete el agua, comúnmente conocido como lodo residual. (Barrera-Díaz *et al.*, 2011). La selección de la tecnología que se utilizará en una instalación de tratamiento de aguas residuales depende de muchas

circunstancias. Las instalaciones de alta tecnología son más adecuadas para las grandes ciudades, y los sistemas que dependen de las tecnologías naturales son más adecuados para las aldeas y las ciudades pequeñas (Salgot *et al.*, 2018).

## 2. *Clasificación de los tratamientos de agua residuales*

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento, depende de diversos factores como, las características fisicoquímicas del agua residual (DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos), características del efluente de salida requerido, costo y disponibilidad de terreno. El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido por el efluente (Ramalho, 2003).

El agua reciclada puede satisfacer la mayoría de las demandas, en tanto esta sea tratada adecuadamente asegurando la calidad apropiada para su uso. Dependiendo del tipo de reutilización, la gama de requisitos de tratamiento va desde el tratamiento secundario y la desinfección, hasta la oxidación, coagulación, filtración y desinfección de alto nivel (EPA, 2012). Teniendo así, cuatro niveles de tratamiento de aguas residuales: pretratamiento,

tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario y/o avanzado.

El pretratamiento y tratamiento primario se emplea para la eliminación de sólidos en suspensión y materiales flotantes. Este depende, tanto de los límites de descarga al medio receptor como del límite necesario para llevar el efluente a un tratamiento secundario. Los procesos de tratamiento primario convencionales están integrados por cribado, sedimentación, flotación, separación de aceites, homogenización y neutralización (Ramalho, 2003).

El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales, teniendo como objetivo la reducción de la materia orgánica y de compuestos inorgánicos. El tratamiento biológico comprende: 1) la conversión de la materia orgánica carbonosa disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares, 2) la formación de lodos biológicos de material celular y de los coloides orgánicos presentes en las aguas residuales, y 3) la subsiguiente remoción de dichos lodos por medio de sedimentación por gravedad (Tejocote *et al.*, 2010).

El tratamiento terciario y/o avanzado busca la destrucción de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales (Ramalho, 2003) son procesos que buscan una excelente calidad del efluente eliminando materiales disueltos y suspendidos restantes de tratamientos

biológicos, logrando que las aguas que han sido tratadas bajo este proceso tengan diversas aplicaciones entre ellas su reutilización. Estos procesos se aplican para remover compuestos orgánicos, inorgánicos, compuestos fosforados, sustancias nitrogenadas, metales pesados, entre otros (Metcalf y Eddy, 2003).

## **2. Procesos acoplados**

### *2.1 Tratamientos de Oxidación Avanzada*

La conservación del medio ambiente requiere un desarrollo para evitar comprometer los recursos naturales existentes, convirtiéndose gradualmente en el objetivo principal del tratamiento de aguas residuales. Las técnicas físicas, químicas y biológicas tradicionales son ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes orgánicos biodegradables, sin embargo estas son inadecuadas para el tratamiento de diversos tipos de efluentes industriales y agrícolas, mostrando ciertas desventajas, ya que son relativamente caras, ineficientes y consumen mucho tiempo (Ltaïef *et al.*, 2017).

Por esta razón dentro del tratamiento de aguas residuales se han generado procesos viables, conocidos como Procesos Avanzado de Oxidación (POA), cuyo propósito es producir radicales

hidróxido ( $\cdot\text{OH}$ ), los cuales tienen la capacidad de oxidar una amplia variedad de compuestos orgánicos debido a su potencial estándar de reducción ( $E= 2.8\text{V}$ ). Dentro de sus principales ventajas se tiene que no es un oxidante selectivo por lo que reacciona con toda la materia orgánica presente en el agua residual logrando una degradación parcial (conversión de contaminante a productos de oxidación intermedios) o mineralización completa (conversión  $\text{CO}_2$ , agua e iones inorgánicos) (Peralta *et al.*, 2014).

Estos procesos son especialmente eficientes para moléculas aromáticas gracias a la sustitución no selectiva de aromáticos electrofílicos del radical hidroxilo en los restos aromáticos, llevando finalmente las reacciones de apertura del anillo (Ltaïef *et al.*, 2017). En la tabla 1 se presentan los principales POA, siendo las más comunes combinaciones de ozono ( $\text{O}_3$ ), peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), radiación UV y fotocatalisis (Bernal *et al.*, 2014).

Tabla 1. Principales Procesos de Oxidación Avanzada

<b>Procesos de Oxidación Avanzada</b>
<b>Sin aporte externo de energía</b>
Ozonización en medio alcalino (O <sub>3</sub> / OH <sup>-</sup> )
Ozonización con peróxido de hidrogeno (O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
Peróxido de hidrogeno y catalizador (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / Fe <sup>+2</sup> )
<b>Con aporte externo de energía</b>
Energía procedente de radiación UV
Ozonización y radiación ultravioleta (O <sub>3</sub> / UV)
Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV)
Ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta (O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV)
Foto-Fenton (Fe <sup>+2</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV)
Energía procedente de ultrasonidos
Ozonización y ultrasonidos (O <sub>3</sub> / US)
Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / US)
<b>Electroquímica</b>
Oxidación electroquímica
Oxidación anódica
Electro-Fenton
<b>Procesos Heterogéneos</b>
Ozonización catalítica (O <sub>3</sub> / cat)
Ozonización foto catalítica (O <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub> / UV)
Fotocatálisis heterogénea (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / TiO <sub>2</sub> / UV)

Fuente: Bernal *et al.* 2014

### 2.1.1 Oxidación electroquímica

El objetivo de la oxidación electroquímica o electro-oxidación es lograr que los contaminantes contenidos en las aguas se transformen en otras especies con menor impacto ambiental o se

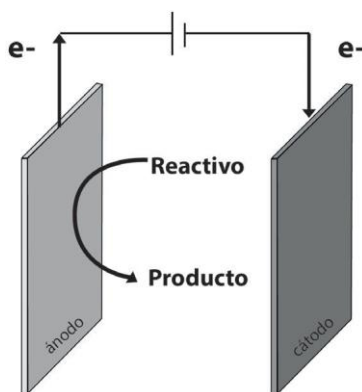
destruyan por completo (mineralización) mediante reacciones de oxidación, como se observa en la reacción 1 (Rodrigo *et al.*, 2014), ayudando a la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales.



La oxidación electroquímica de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales puede proceder de diversos mecanismos, ya que durante el tratamiento en los electrodos pueden llevarse a cabo reacciones distintas a la eliminación del contaminante. Una de ellas es la reacción donde se generan especies químicas con capacidad de oxidar o reducir los contaminantes contenidos en el agua residual. Un ejemplo de esto es el tratamiento de aguas residuales que contengan cloruros, ya que estos al oxidarse forman hipoclorito y este actuará sobre los contaminantes oxidándolos y convirtiéndolos en otras especies químicas. Así entonces, la oxidación electroquímica puede llevarse de dos maneras (Chen, 2004):

- Oxidación directa: Los contaminantes son oxidados directamente sobre la superficie del electrodo, estos son absorbidos primero en la superficie del ánodo y luego destruidos por la reacción de transferencia electrónica

anódica (Rajkumar y Palanivelu, 2003). Las reacciones son de tipo superficial por lo que adquieren gran importancia los fenómenos de transporte del contaminante hacia el electrodo (Rodrigo *et al.*, 2014). Esto se muestra en la figura 1:



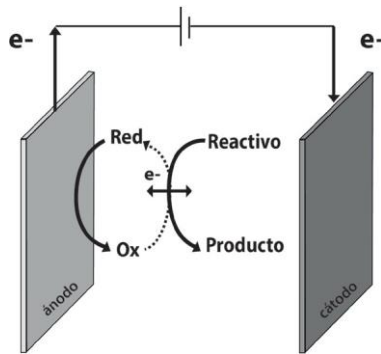
Fuente: Rodrigo *et al.*, 2014

Figura 1. Oxidación Directa

- Oxidación indirecta: Los contaminantes se destruyen debido a la reacción de oxidación generada por un agente oxidante el cual se puede adicionar, o se encuentra presente dentro de la naturaleza del agua residual (Rajkumar y Palanivelu, 2003). Al tratarse de reacciones de tipo químico, estas suceden en todo el volumen de reacción y están influenciadas por la temperatura, por lo que,



no son tan importantes los fenómenos de transporte del contaminante hacia el electrodo (Rodrigo *et al.*, 2014) (figura 2).



Fuente: Rodrigo *et al.*, 2014

Figura 2. Oxidación Indirecta

El rendimiento de los procesos electroquímicos, como la electro-oxidación depende de una serie de parámetros que pueden ser optimizados para obtener una degradación completa o parcial del contaminante de forma efectiva y económica. Los principales factores que determinan el rendimiento de una electrólisis son los siguientes (Panizza, 2010):

- a) *Potencial de electrodo y densidad de corriente.* Permite el control sobre el proceso ocurriendo sólo la reacción deseada y determina comúnmente la eficiencia del proceso.

- b) *Distribución de corriente.* Determina la distribución espacial de los consumos de reactivos, por lo que debe ser lo más homogénea posible.
- c) *Régimen de transporte de masa.* Un alto coeficiente de transferencia de masa conduce a una buena uniformidad de la concentración del contaminante en la superficie del electrodo, lo que conlleva a una mayor eficiencia.
- d) *Diseño de la celda.* El tamaño de la celda, la presencia o ausencia de un separador, la elección del electrodo, etc., afectan el rendimiento del proceso electroquímico.
- e) *Medio de Electrolisis.* La elección del electrolito su concentración, pH y la temperatura.
- f) *Material del electrodo.* El material ideal para un electrodo en la degradación del contaminante debe ser totalmente estable en el medio de electrolisis, económico y mostrar una alta actividad hacia la oxidación orgánica y baja actividad hacia las reacciones secundarias.

### 2.1.2 Ozonación

La ozonación es un proceso muy conocido y utilizado en el tratamiento de aguas residuales, pues se eliminan compuestos orgánicos e inorgánicos, se reduce el carbono orgánico total (COT), así como el olor, color, sabor y turbidez. Además de que presenta ventajas sobre el cloro, el dióxido de cloro y las cloraminas pues es más potente y rápido como desinfectante (Cano, 2011).

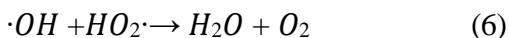
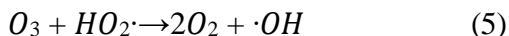
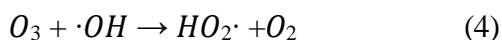
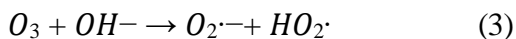
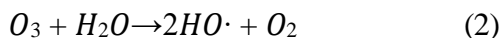
El ozono es uno de los agentes oxidantes más conocidos y estudiados. Desde el punto de vista químico el ozono ( $O_3$ ) es una forma alotrópica del oxígeno y es, también, el compuesto más oxidante después del flúor por su capacidad de captar electrones. Debido a que es un compuesto inestable en presencia de aire (se descompone y origina de nuevo moléculas de oxígeno), este debe ser generado *in situ* para poder ser usado en el tratamiento y remediación de aguas residuales.

Cuando se inyecta el ozono en el agua a tratar, este puede ejercer su poder oxidante mediante dos mecanismos de acción:

- a) Oxidación directa de los compuestos orgánicos mediante ozono molecular.
- b) Oxidación indirecta mediante radicales hidroxilo ( $\cdot OH$ ).

Los radicales hidroxilo se generan por reacciones del agua con las moléculas de ozono y, estos después trabajan como fuertes oxidantes. Cabe señalar que los radicales hidroxilos reaccionan de manera inmediata con los solutos y esto hace de esta vía de oxidación menos selectiva que la correspondiente a la directa (por O<sub>3</sub>) (Hernández, 2011).

De acuerdo con Pérez (2005), el efecto de la ozonación, o sea, las reacciones entre ozono y agua son iniciadas mediante las siguientes reacciones (reacciones de la 2 a 6):



Una de las condiciones para tener en cuenta al momento del tratamiento de aguas por ozono es el valor del pH, pues este tiene una influencia significativa en la velocidad de descomposición del ozono en agua y por tanto del método de oxidación directo o indirecto en el que éste actúa. A pH muy ácidos (pH < 3) los radicales hidroxilos no intervienen en la descomposición de la molécula de ozono, y predomina la oxidación molecular

(directa); en pH básicos ( $7 < \text{pH} < 10$ ) se favorece la formación de radicales hidroxilos y, en consecuencia, la oxidación indirecta (García-Morales *et al.*, 2012).

### 2.1.3 Peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno comercial se genera mediante el proceso de autooxidación, el cual consiste en la reducción de la alquilantraquinona al antraquinol, seguida por su oxidación para dar como resultado a la misma antraquinona con formación del  $\text{H}_2\text{O}$  (figura 3).

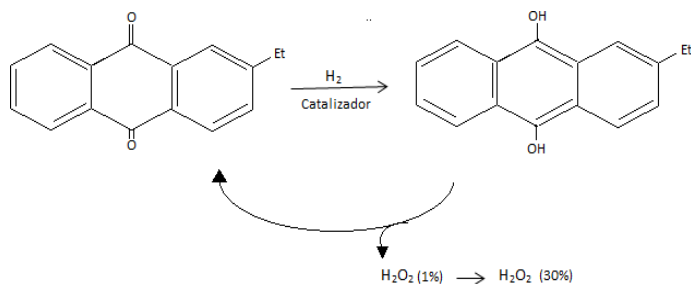


Figura 3. Síntesis del peróxido de hidrógeno

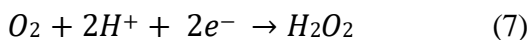
El peróxido de hidrógeno exhibe un carácter ácido débil y sus propiedades oxidativas se originan a partir de sus enlaces covalentes (uno oxígeno-oxígeno y dos oxígeno-hidrógeno), es un reactivo importante en la industria química y particularmente

en las ciencias ambientales, ya que es el reactivo químico principal en algunos POAs (Procesos de Oxidación Avanzada) teniendo un perfil versátil actuando como reductor u oxidante, esto debido a su alto potencial estándar ( $\text{EH}_2\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O} = 1.76 \text{ V vs. SHE}$ ) (Peralta *et al.*, 2014) y además de ser considerado un agente oxidante amigable con el ambiente y sustentable, ya que sus subproductos de oxidación son oxígeno y agua (Espinoza-Montero *et al.*, 2013).

El peróxido de hidrógeno como agente oxidante tiene ciertas ventajas:

- El  $\text{H}_2\text{O}_2$  es comercialmente accesible.
- Es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido de cloro y permanganato de potasio.
- Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilo vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación (Felis y Miksch, 2015)
- Es una fuente efectiva de radicales hidroxilo, ya que produce  $2(\cdot\text{OH})$  por cada molécula de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Con una cantidad suficiente (que varía de acuerdo al tipo de contaminante) de peróxido de hidrógeno y de tiempo de reacción, la mayoría de los compuestos pueden ser transformados en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Song-Ravindran *et al.*, 2008).

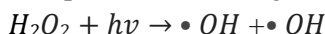
Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento de efluentes industriales (Rodriguez *et al.*, 2008). Sin embargo, existen también algunos inconvenientes al trabajar con soluciones de peróxido de hidrogeno como son su almacenamiento, manipulación, descomposición y corrosividad. Debido a esto es conveniente su producción continua *in-situ*. En este sentido la síntesis electroquímica es una alternativa, mediante la reacción del oxígeno vía dos electrones (reacción 7):



La electrogeneración del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> depende fuertemente de la superficie del electrodo, pero generalmente procede con mayor eficiencia en electrodos de carbón. Se han probado diversos materiales como carbón vítreo reticulado, telas de carbón, grafito, cátodos de difusión de oxígeno y el diamante dopado con boro.

Existen diversos procesos avanzados de oxidación en los que se ve involucrado el uso de peróxido de hidrógeno para la producción del radical hidroxilo (Peralta *et al.*, 2014), algunos de los más importantes son:

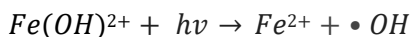
- a) Fotólisis del peróxido de hidrógeno



- b) Electro-Fenton



- c) Fotoelectro-Fenton



## 2. Consideraciones económicas

Uno de los factores claves de evaluación para la aplicación de un proceso dado en el tratamiento de aguas residuales es la viabilidad económica. Como es el caso de la oxidación electroquímica con DDB (diamante dopado con boro), donde se debe estudiar principalmente la minimización del consumo de energía al escalarlo de laboratorio a aplicaciones industriales, ya que por lo general los procesos convencionales como tratamientos biológicos, clarificación, oxidación en aire húmedo, tecnologías de biorreactor de membrana, son más económicos. Sin embargo, estos presentan desventajas en las últimas décadas, con las regulaciones más estrictas que se aplican a las aguas residuales y aguas



potables. Debido a esto crece el interés por los POAs que resultan ser menos económicos, pero presentan una ventaja importante, puesto que estos pueden lograr la minimización completa del contaminante como es el caso del tratamiento electroquímico con DDB, traduciéndose no solo en el cumplimiento de las regulaciones, sino también en una minimización de los costos al no generar subproductos como residuos que posteriormente requieren otro tipo de tratamientos (Polcaro *et al.*, 2007). El costo del proceso también depende de parámetros como concentración del contaminante, el electrolito, el diseño de la celda y una correcta escalación a nivel industrial, lo que permita una comparación confiable con otras tecnologías.

Los tratamientos combinados, muestran una optimización en el tratamiento de aguas residuales, pues disminuyen el tiempo de tratamiento por consiguiente el consumo energético, resultando en la disminución del costo. Por ejemplo, Kusic *et al.* (2006) mostraron que, aunque todos los POAs tradicionales pueden oxidar el fenol, la mineralización fue baja ya que los mejores rendimientos fueron obtenidos en un proceso combinado de UV / O<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en el que la eliminación de COT fue igual al 58 %: el proceso combinado de UV / O<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> debe preferirse al proceso de O<sub>3</sub> no solo por una mayor remoción, sino

que este también presenta un menor costo. La mineralización completa de 0.5 g/L de fenol en el ánodo BBD requiere 18 kWh/kg de DQO asumiendo un precio de la energía eléctrica de 0.07 Euro kWh el costo operativo de este tratamiento resulta 1.26 Euro kg COD que es menor que el evaluado para la ozonización (Polcaro *et al.*, 2007).

### **3. Aplicación a nivel laboratorio**

Se propuso comparar los tratamientos de electrooxidación, ozonación, el acoplamiento electrooxidación-O<sub>3</sub> y electrooxidación-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para el tratamiento del surfactante nonilfenol, buscando conocer la eficiencia de estos procesos y si existía una optimización al acoplar los tratamientos, obteniendo mejores porcentajes de remoción, disminución de tiempo de tratamiento y consumo de energía y por consecuencia un menor costo de operación.

El nonilfenol es una mezcla de isómeros; el componente dominante (aproximadamente 90%) es 4-nonilfenol (4-NP), el cual se bioacumula en organismos acuáticos a bajas concentraciones (El-Shafei *et al.*, 2017). Es un compuesto xenobiótico tóxico clasificado como un disruptor endocrino capaz de interferir con el sistema hormonal de numerosos organismos. Se origina principalmente a

partir de la degradación de los etoxilatos de nonilfenol los cuales son utilizados como agentes tensoactivos industriales (Mao *et al.*, 2012). El NP ha llamado la atención debido a sus propiedades de bioacumulación, mala biodisponibilidad e impactos biológicos que incluyen efectos carcinogénicos, teratogénicos y mutagénicos y este muestra una mayor estrogenicidad que los etoxilados de nonilfenol de cadena corta, nonilfenol polietoxicarboxilatos de cadena corta (NPEC) (Bai *et al.*, 2017). Se han estimado vidas medias para la biodegradación del nonilfenol de 300 y 150 días en el suelo y el agua superficial, respectivamente, aunque la biodegradación de NP puede depender de múltiples factores sobre las condiciones ambientales presentes. Actualmente, la EPA (Agencia de Protección Ambiental) ha preparado una guía para la calidad de agua ambiental, debido a los riesgos que el nonilfenol muestra sobre los organismos, donde recomienda concentraciones de nonilfenol en agua dulce por debajo de 6.6  $\mu\text{g/L}$  y en agua salada por debajo de 1.7  $\mu\text{g/L}$ .

Debido a los efectos que ocasiona el nonilfenol sobre los organismos que se encuentran en contacto con el mismo, es necesario contar con tratamientos eficientes que logren su remoción. Para ello los tratamientos de oxidación avanzada han mostrado ventajas frente a los tratamientos

convencionales, se han estudiado diversos tratamientos biológicos para la degradación del nonilfenol, como es el estudio de Bai y colaboradores en 2017, donde consiguieron la mejor degradación obtenida mediante un consorcio bacteriano NP-M2 logrando degradar 75.61 % y 89.75 % de 1000 mg/L NP dentro de las 48 h y 8 días respectivamente. Por otro lado, se informa que el uso de un catalizador suspendido que contiene nanopartículas de dióxido de titanio que pueden degradar NP hasta 90 % (Xin *et al.*, 2014). Sin embargo, un inconveniente principal de este procedimiento es que requiere una separación adicional entre el catalizador suspendido y el agua tratada. Es por ello que en el siguiente ejemplo de aplicación ambiental se propone el uso de tratamientos acoplados para la degradación de nonilfenol, buscando mejorar el porcentaje de remoción, disminuir el tiempo de tratamiento y con ello el consumo de energía y el costo de operación respecto al mismo, destacando las ventajas de los tratamientos acoplados sobre los tratamientos en forma individual.

### *3.1 Metodología*

La metodología que se siguió consistió en tres etapas principales: determinación de las condiciones óptimas de los tratamientos propuestos,

acoplamiento de los procesos y evaluación de la eficiencia de remoción del nonilfenol.

La cuantificación del nonilfenol se llevó a cabo mediante diversas técnicas analíticas: Espectrofotometría (UV-Vis), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT) y la cuantificación del consumo de  $H_2O_2$  se realizó mediante la técnica de determinación colorimétrica de  $H_2O_2$  por sulfato de titanio (Eisenberg, 1943).

### *3.1.1 Electro-oxidación.*

El proceso electroquímico continuo se llevó a cabo en un reactor electroquímico tipo celda DiaClean® (equipada con electrodo DDB/Si como ánodo y acero inoxidable como cátodo, con un área de contacto de  $70\text{cm}^2$  y una distancia entre ellos de  $0.5\text{cm}$ ) operando de forma continua y en recirculación (figura 4). El tratamiento comenzó al colocar la solución acuosa de nonilfenol en el tanque de alimentación compuesto de HDPE material inerte con una capacidad de hasta  $10\text{dm}^3$  (para fines de este trabajo solo se ocuparon  $4\text{dm}^3$  de su capacidad total). La solución acuosa de nonilfenol es impulsada al con ayuda de una bomba peristáltica Masterflex B/T Cole-Parmer, Modelo 77111-6, pasando a través de una tubería tubo de polipropileno (Tuboplus®) conectada mediante

electrofusión, los electrodos del reactor se encuentran conectados a una fuente de poder GW Modelo GPS-3030D que alcanza valores en un intervalo de 1-3A y es aquí donde se lleva a cabo la oxidación del nonilfenol. El control de temperatura del sistema se realiza por medio de un intercambiador de calor de tubos aletados instalado a la salida del reactor, lo que permite mantener una temperatura constante en el sistema (20-23°C). Una vez que a solución sale del intercambiador de calor es enviada de nuevo al tanque de alimentación y vuelve a circular por el sistema.

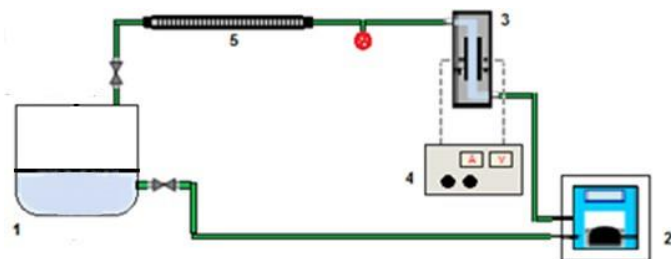


Figura 4. Instalación del sistema de tratamiento electroquímico (1. Tanque de almacenamiento, 2. Bomba peristáltica, 3. Reactor electroquímico, 4. Fuente de poder, 5. Intercambiador de calor)

La solución se preparó con agua destilada con 50 ppm de NP y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.05 M, con el fin de observar la respuesta del tratamiento, con respecto al cambio de pH y densidad de corriente se probaron

valores de pH a 3, 5 y 7 y densidades de corriente de 10, 20 y 30 mA/cm<sup>2</sup>. Se tomaron muestras a intervalos regulares durante 4 h para determinar los valores de DQO. Los experimentos se realizaron por triplicado y los valores mostrados son el promedio de los datos registrados.

### *3.1.2 Ozonación*

La ozonación, se llevó a cabo en un reactor batch de vidrio, con una capacidad de 1.2 L a temperatura ambiente. El suministro de ozono se realizó mediante un generador de ozono marca Pacific Ozone, el cual es alimentado a través de una placa porosa situada en el fondo del reactor. La concentración media de ozono en la fase gaseosa se midió utilizando la técnica índigo y se mantuvo a  $5 \pm 0.5$  mg/L (Felis y Miksch, 2015). Para toda la serie de experimentos se usó una solución acuosa sintética que contenía 50 ppm de NP en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.05 M. Se realizaron experimentos de ozonización a valores de pH de 3, 5 y 7 y se tomaron muestras a intervalos regulares durante 3 horas para determinar la DQO. El experimento se realizó por triplicado y los valores mostrados son el promedio de los datos registrados.

### *3.1.3 Ozonación-Electrooxidación*

Para el proceso acoplado, la solución acuosa de NP se dividió en tres lotes; cada uno se trató durante 30 minutos con ozono antes del tratamiento electroquímico a pH 7. A continuación, se mezclaron los 3 lotes en el tanque de alimentación del sistema de electrooxidación (sección 3.1.1). El segundo tratamiento se llevó a cabo en el sistema de electrólisis continua durante 90 min. Se utilizó una densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup>. Se tomaron muestras a intervalos regulares a lo largo de los dos pasos del proceso para determinar los valores de DQO y COT. El experimento se realizó por triplicado y los valores mostrados son el promedio de los datos registrados.

### *3.1.4 Electrooxidación-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*

El acoplamiento del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como agente oxidante al tratamiento electroquímico del nonilfenol, se llevó a cabo adicionando tres diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0.5, 1.0 y 1.5 mL/L) de forma directa al tanque de alimentación del sistema de electrooxidación (sección 3.1.1) con el fin de conocer la influencia de la concentración del agente oxidante en la remoción del NP. Durante las dos horas de tratamiento se tomaron muestras a diferentes intervalos de tiempo,



para determinar DQO, COT y el consumo de peróxido de hidrógeno.

### 3.2 Resultados

#### 3.2.1 Influencia de la densidad de corriente y pH en la electrooxidación del NP

La disminución de la DQO fue del 87%, 60% y 50% para pH 3, 5 y 7, respectivamente (figura 5). Como lo han propuesto los experimentos electroanalíticos, la degradación tiene dos vías: la electrólisis directa y el porcentaje de oxidación de radicales  $\bullet\text{OH}$ . Se ha informado que este último se favorece a valores de pH bajos, por lo tanto, a un pH de 3, el porcentaje de degradación del radical  $\bullet\text{OH}$  debe ser más rápido que la electrólisis directa para eliminar los compuestos orgánicos (Curteanu *et al.*, 2014).

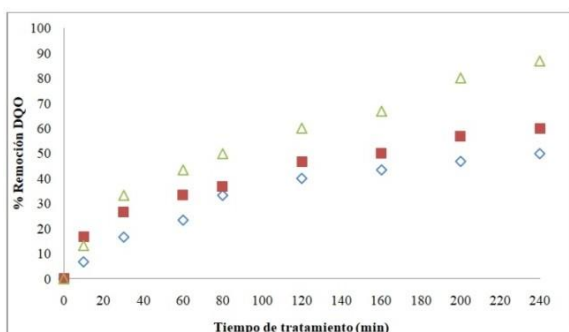


Figura 5. Perfil de remoción de DQO a diferentes valores de pH ( $\diamond$ ) 7, ( $\blacksquare$ ) 5 y ( $\Delta$ ) 3,  $30\text{mA}/\text{cm}^2$

Por otra parte, cuando se estudia la influencia de la densidad de corriente en el tratamiento electroquímico para la degradación del NP, se puede notar que la remoción de DQO se ve afectada por la densidad de corriente con la que se trabaja en el tratamiento electroquímico, observando un mejor perfil de degradación del nonilfenol a una densidad de corriente de  $30 \text{ mA/cm}^2$ , alcanzando un 86% de remoción, mientras que al trabajar con una densidad 10 y  $20 \text{ mA/cm}^2$  se logra una remoción del 50 y 60% respectivamente (figura 6), lo que indica que la remoción de DQO se ve mejorada al trabajar bajo densidades de corriente altas. Esto se debe a que la producción de radicales hidroxilo a lo largo del tratamiento, responsables de la oxidación del nonilfenol, está directamente relacionada con la densidad de corriente, ya que al aplicar una mayor densidad de corriente permite alcanzar un mayor potencial que permite abrir la barrera de oxidación del agua de forma más rápida sobre la superficie del electrodo DDB y es aquí cuando se forman los radicales hidroxilo los cuales posteriormente son los responsables de la oxidación del NP.

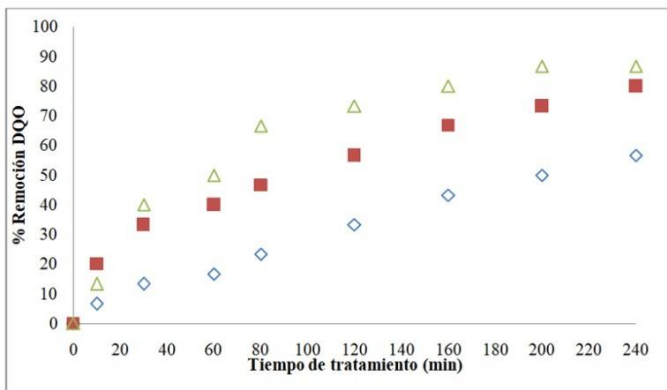


Figura 6. Perfil de remoción de DQO a diferentes densidades de corriente (◇) 10, (■) 20 y (△) 30mA/cm<sup>2</sup>, a pH 3

### 3.2.2 Influencia del pH en la ozonación del NP

Durante el tratamiento de ozonación de la solución del NP, se obtuvieron los espectros UV-Vis (figura 7), observando que el pico máximo característico del surfactante ubicado a los 275 nm se movió completamente después de 10 minutos a 300 nm, encontrando que otras especies se generan por la interacción con el ozono y se absorben a una longitud de onda más alta. Esta especie es oxidada por los radicales  $\cdot\text{OH}$  producidos por el ozono en medios básicos hasta su degradación. Sin embargo, 120 minutos no es suficiente para consumir totalmente estos intermediarios.

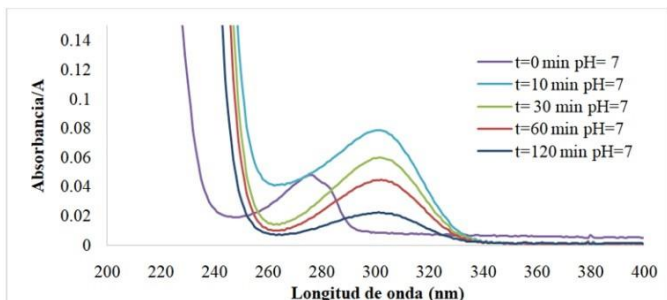


Figura 7. Curvas UV-Vis del tratamiento de ozonización de solución de nonilfenol (50 ppm) después de 10 min de degradación a diferentes densidades de corriente

Los valores de DQO durante la ozonización fueron monitoreados en función del tiempo de tratamiento a diferentes valores de pH. Como se muestra en la figura 9, los porcentajes de remoción de DQO fueron del 67%, 81% y 96% para pH 3, 5 y 7, respectivamente después de 120 minutos de tratamiento. El valor del pH en la solución juega un papel importante en la degradación de los contaminantes que utilizan la ozonización. A un pH bajo, el mecanismo predominante es el ataque directo por ozono molecular. A un pH alto, el ozono se descompone en agua formando radicales  $\cdot\text{OH}$  que son agentes oxidantes más fuertes que el ozono molecular y favorecen la degradación. Estos radicales inducen la llamada ozonización indirecta. La oxidación indirecta del ozono no es selectiva y,

en general, es más rápida que la ozonización directa (Kasprzyk-Hordern *et al.*, 2003).

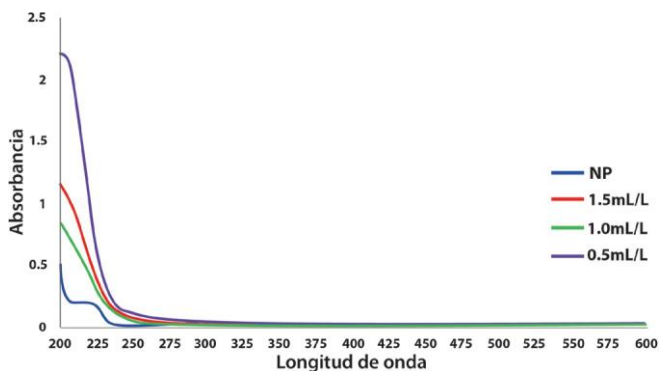


Figura 8. Espectro de absorción del tratamiento electroquímico del NP acoplado peróxido de hidrógeno como agente oxidante en diferentes dosis (pH= 3, 30mA/cm<sup>2</sup>, 14L/min y 120 min de tratamiento)

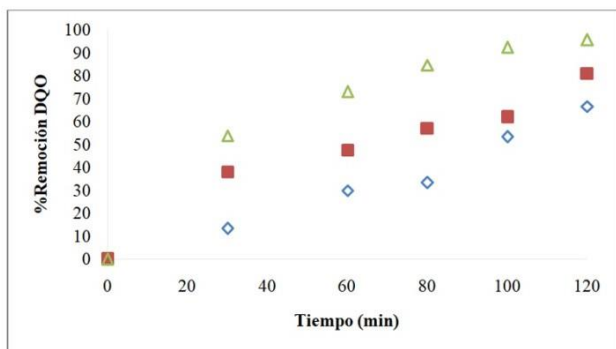


Figura 9. Efecto del pH (◇) 3, (■) 5 y (△) 7 sobre el % de remoción de DQO

### *3.2.3 Influencia de la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como agente oxidante*

Mediante estudios de absorbancia, se encontró que bajo el suministro de las tres diferentes dosis de peróxido de hidrógeno (0.5, 1.0 y 1.5 mL/L), existía un comportamiento similar. Después de agregar la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al sistema, la absorbancia a 275nm es mayor que la que muestra el agua cruda (NP y agua destilada), a partir de los 5 min de tratamiento. En los tres casos el espectro se presenta como una línea asintótica desapareciendo el máximo característico del NP. A partir de los 10 min se presentó un efecto hipocrómico en las absorbancias, acercándose cada vez a una absorbancia 0, desapareciendo por completo los picos máximos característicos del surfactante, por lo que se puede afirmar una degradación casi completa del mismo. Sin embargo, al comparar los espectros de las tres diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a los 120 min (figura 8), se observa una menor absorbancia a los 275nm cuando se suministra al sistema 1.5 mL/L la dosis más alta propuesta, por lo que la degradación del NP es dependiente de la dosis suministrada del agente oxidante, y ésta incrementa al tener una mayor concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el sistema.

Dentro de la determinación de la Demanda Química de Oxígeno, se observó que el peróxido de

hidrógeno ejercía una influencia sobre los valores de este parámetro, la cual estaba directamente relacionada a la cantidad del agente oxidante que se suministraba, debido a esto fue necesario calcular el consumo de  $\text{H}_2\text{O}_2$  mediante colorimetría con sulfato de titanio, para después realizar una correlación entre los mg/L que se tenían del agente oxidante a lo largo del tratamiento y los mg/L obtenidos en el parámetro de la DQO que permitiera realizar la corrección a los perfiles de remoción.

Para poder conocer la concentración del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en mg/L se realizó una curva de calibración, mediante una solución estándar de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30 %, realizando disoluciones correspondientes a las concentraciones en mg/L de cada una de las dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  que se propusieron (0.5, 1.0 y 1.5 mL/L), leyendo posteriormente sus absorbancias a la longitud de onda de 408 nm. Obteniendo así dos curvas de calibración, una correspondiente a concentraciones bajas (1-60.88 mg/L) y otra a concentraciones altas (61-750 mg/L) (figura 10).

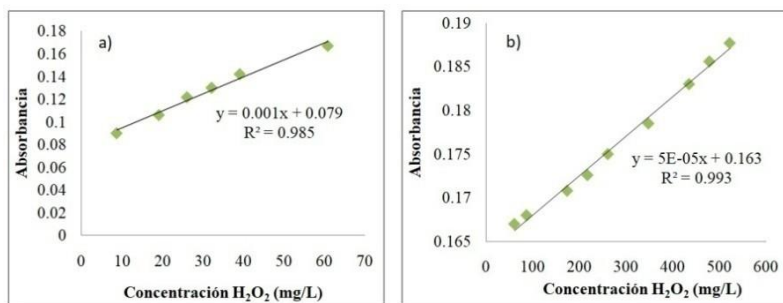


Figura 10. Curvas de calibración de la concentración de peróxido de hidrógeno

Con ayuda de estas curvas de calibración, se determinó la cantidad de  $H_2O_2$  que existía en el sistema a lo largo del tratamiento (120 min) en diferentes intervalos de tiempo, para cada una de las dosis suministradas al sistema. Como se muestra en la siguiente tabla, se asume en los tres casos, que el  $H_2O_2$  se está consumiendo y ayudando a la degradación del NP.

Tabla 2. Concentración del  $H_2O_2$  respecto a la absorbancia

Dosis de $H_2O_2$ (mL/L)	Absorbancia (inicial-final)	Concentración mg/L (inicial-final)
0.5	0.1642-0.0995	56.33-13.53
1.0	0.1706-0.0473	144-2.5
1.5	0.2054-0.0873	840-5.4

Una vez que se conocieron los mg/L que se tenían de  $H_2O_2$  en la solución, a lo largo del



tratamiento, estos se relacionaron con los valores de DQO que se obtenían, pues se sabe que la muestra cruda, es decir la solución de 50ppm de NP contiene 18mg/L de DQO. Este valor se compara con la medida de DQO que se tiene al minuto cero, cuando se ha adicionado el  $H_2O_2$  en las tres diferentes dosis, dando como resultado que la resta entre estos dos valores representaría los mg/L que existen de interferencia de  $H_2O_2$  (este valor se comprobó, midiendo la DQO que presentaría una solución con la concentración correspondiente a cada una de las dosis 0.5, 1.0 y 1.5 mL/L de  $H_2O_2$ ). Una vez obtenidos los mg/L que corresponden al  $H_2O_2$  dentro de la medida de DQO se corrigieron estos valores en los perfiles de remoción.

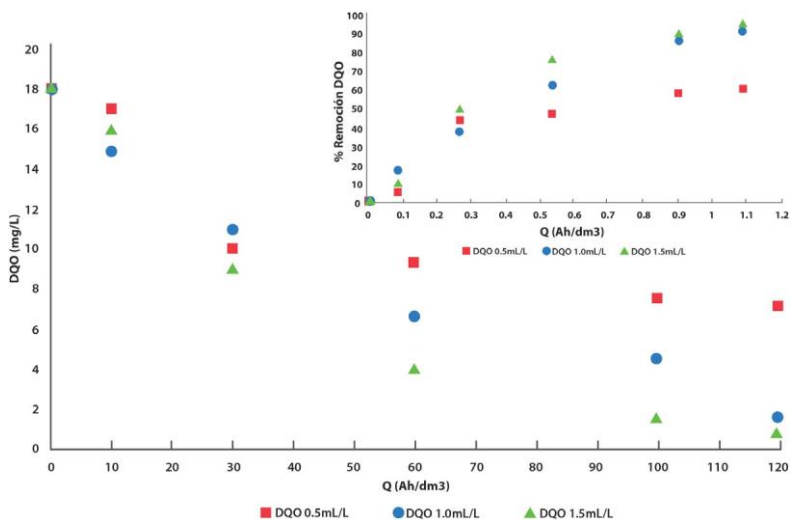


Figura 11. Perfil de remoción de la DQO del Tratamiento Electroquímico del NP acoplado al peróxido de hidrogeno en diferentes dosis (pH= 3, 30mA/cm y 14L/min)

De acuerdo con los perfiles de remoción de DQO, la mejor degradación del NP se tiene cuando se añaden 1.5 mL/L de  $H_2O_2$  al sistema, alcanzando un 95% en comparación a un 60.48 % y 91.7 % añadiendo 0.5 y 1.0mL/L respectivamente (figura 11). Obteniendo así que la dosis del agente oxidante suministrado tiene un efecto sobre la remoción del NP, pues la remoción incrementa cuando se tiene una alta concentración de  $H_2O_2$ . Estos valores se comprobaron mediante COT, una medida más exacta en la remoción de materia orgánica y en la cual no existen interferencias en el caso de trabajar con peróxido de hidrógeno. Se alcanzó una

remoción del contaminante del 98% aplicando una dosis de 1.5 mL/L, al suministrar 0.5 y 1.0 mL/L se obtuvieron 68% y 97.6 % de remoción respectivamente (figura 12).

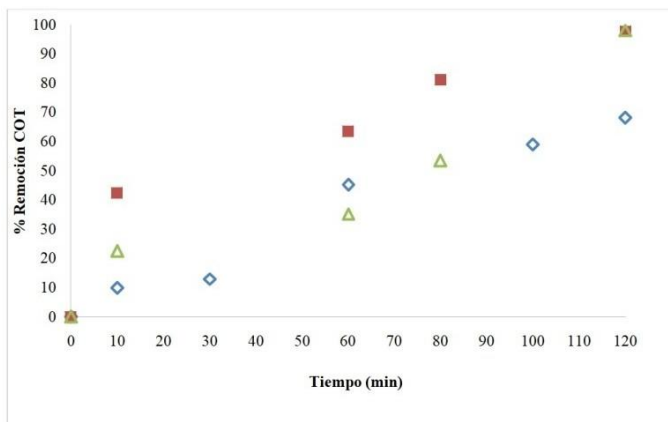
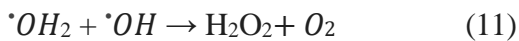
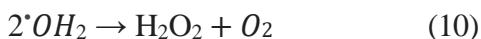
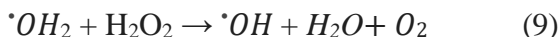
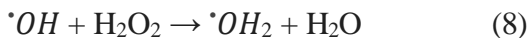


Figura 12. Perfil de remoción de la COT del tratamiento electroquímico del NP acoplado peróxido de hidrógeno en diferentes dosis ( $\diamond$ ) 0.5, ( $\blacksquare$ ) 1.0 y ( $\triangle$ ) 1.5 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pH= 3, 30mA/cm<sup>2</sup> y 14L/min).

La relación que existe entre la degradación del NP y la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> suministrada al sistema se debe la producción del radical hidroxilo responsable de la degradación de la molécula, puesto que al tener una mayor concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el sistema se tendrá una mayor producción del radical que, junto a los generados por el electrodo DDB, degradarán de manera más rápida la molécula. Sin embargo, se debe tener principal cuidado con la dosis

suministrada de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pues si ésta es mayor a la óptima, es decir se tiene un exceso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se puede presentar una disminución en la velocidad de degradación pues se generaría el radical perhidroxilo (\*OH<sub>2</sub>) debido a que se originan reacciones competitivas con efectos inhibidores. El peróxido de hidrógeno en exceso, actúa capturando los radicales hidroxilo formando el perhidroxilo (\*OH<sub>2</sub>) radical menos reactivo (Rodríguez *et al.*, 2008) (reacciones 8 a 11).



Debido a que no existe una diferencia significativa de remoción del NP en dos horas de tratamiento al usar 1.0 o 1.5 mL/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (97.6 y 98 % respectivamente), se eligió dosis óptima de 1.0 mL/L.

### 3.2.4. Comparativa entre los tratamientos propuestos (eficiencia de remoción, tiempo de tratamiento, consumo de energía y costo de operación)

Para la evaluación de la viabilidad de los tratamientos, se consideraron el porcentaje de remoción, el tiempo de tratamiento y el costo de operación respecto al consumo de energía. Se observó que respecto al porcentaje de remoción el tratamiento DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (98 %), no solo muestra una ventaja sobre la electro-oxidación del NP (DDB) (87 % y ozonación 96%, sino también sobre el tratamiento acoplado DDB- O<sub>3</sub> (91 %) (Figura 13).

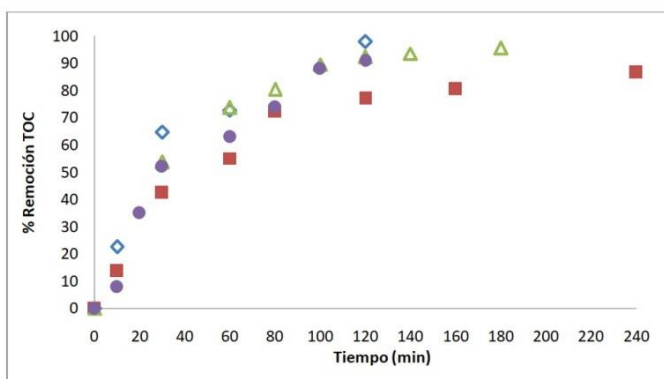


Figura 13. Evaluación del % de remoción del tratamiento del nonilfenol (■) DDB, (Δ) O<sub>3</sub>, (●) DDB-O<sub>3</sub> y (◇) DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Respecto al tiempo de tratamiento (figura 14), se tiene una optimización con los tratamientos

acoplados DDB-O<sub>3</sub>, DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (120 min), respecto al tratamiento DDB (electrooxidación) y ozonación, observando que la aplicación de tratamiento electroquímico acoplados optimiza la degradación de los contaminantes orgánicos, pues se logran porcentajes de remoción iguales o mayores en un menor tiempo de operación, lo que se traduce en un ahorro del consumo de energía. Sin embargo, al comparar el tratamiento de ozono con los tratamientos combinados, encontramos que no existe una diferencia significativa en cuanto a porcentaje de remoción y se requiere del mismo tiempo de tratamiento.

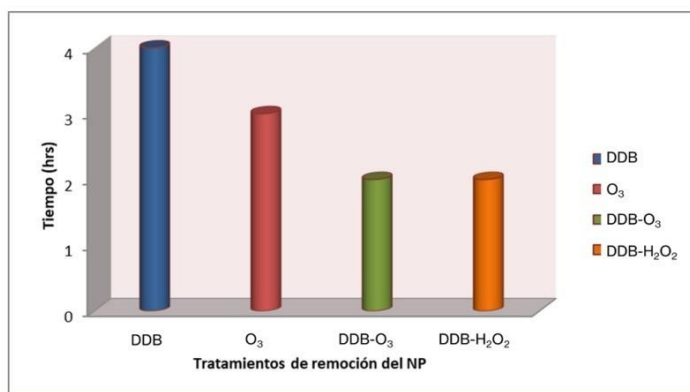


Figura 14. Evaluación del tiempo de tratamiento DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> respecto a otras tecnologías

Para la evaluación del costo de operación en relación con el consumo de energía, se sumó el

consumo de energía generado por la operación del reactor (celda DiaClean) y el correspondiente a la bomba peristáltica para los tratamientos de electrooxidación, electrooxidación-O<sub>3</sub> y electrooxidación-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Para el tratamiento de ozonación el cálculo mediante el consumo de energía requerido por generador de ozono (Figura15).

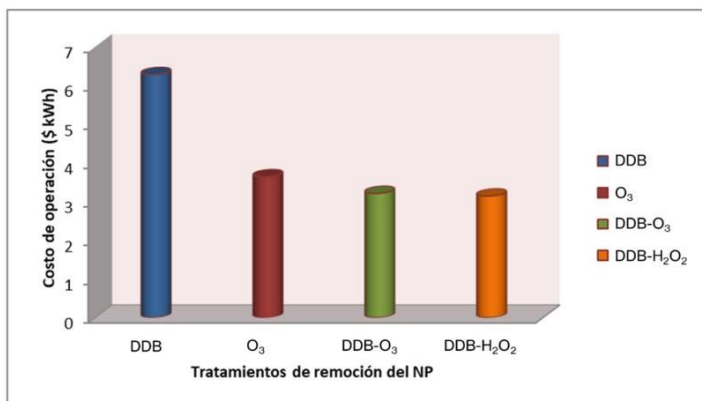


Figura 15. Evaluación del costo de operación respecto al consumo de energía

Se puede observar que al trabajar con tratamientos avanzados acoplados como es el caso de DDB-O<sub>3</sub> y DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, respecto a DDB representan un ahorro en el costo de operación en términos del consumo de energía, pues se logra una optimización de la degradación del NP, obteniendo no solo mejores porcentajes de remociones del compuesto, sino también la disminución del tiempo

de tratamiento y como consecuencia un ahorro del consumo de energía. Sin embargo, respecto al tratamiento con ozono, no existe una gran optimización respecto a la remoción y costo de operación, sólo en el tiempo de tratamiento siendo una hora menos de tratamiento cuando éste es acoplado a la electrooxidación. En cuanto al acoplamiento del tratamiento electroquímico del NP con ánodo de DDB a ozonación o peróxido de hidrógeno, se encontró que con  $H_2O_2$  se obtiene un mayor porcentaje de remoción (98% vs. 91%) y un menor costo de operación en términos del consumo de energía, por lo que el  $H_2O_2$  desempeña un mejor papel como agente oxidante en la degradación del NP.

### *3.3 Conclusiones*

La aplicación de tratamientos acoplados de oxidación avanzada presenta ventajas sobre los tratamientos individuales, pues logran una optimización en el tiempo y costos de operación, siendo una opción viable en el tratamiento de aguas residuales.

El acoplamiento de  $H_2O_2$  al tratamiento electroquímico de NP con un reactor tipo celda DiaClean (BBD- $H_2O_2$ ), presenta un mayor porcentaje de remoción y un menor consumo de



energía que al acoplar al mismo la ozonación (DDB-O<sub>3</sub>). Por lo que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> resulta ser un mejor agente oxidante que el O<sub>3</sub> frente al tratamiento de nonilfenol.

### *Perspectivas*

El tratamiento DDB-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> podría tener una optimización en la velocidad de degradación, si se combina con otros tratamientos como el O<sub>3</sub> y/o UV, pues el peróxido de hidrógeno presenta una baja velocidad de degradación frente a algunas sustancias complejas.

### **Referencias**

- Bai, N., Abuduaini, R., Wang, S., Zhang, M., Zhu, X., & Zhao, Y. (2017a). Nonylphenol biodegradation characterizations and bacterial composition analysis of an effective consortium NP-M2. *Environmental Pollution*, 220, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.027>
- Bai, N., Abuduaini, R., Wang, S., Zhang, M., Zhu, X., & Zhao, Y. (2017b). Nonylphenol biodegradation characterizations and bacterial composition analysis of an effective consortium NP-M2. *Environmental Pollution*, 220, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.027>
- Barrera-Díaz, C., Martínez-Barrera, G., Gencel, O.,

- Bernal-Martínez, L. A., & Brostow, W. (2011). Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes. *Journal of Hazardous Materials*, 192 (1), 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.103>
- Bernal, L.; Barrera, C.; Roa, G.; Solís, C.; Cruz J. (2014). Métodos Electroquímicos Combinados. En C. Barrera (Ed.), Aplicaciones electroquímicas del tratamiento de aguas residuales (p. 281), México: Reverte. Bernal, L.; Barrera, C.; Roa, G.; Solís, C.; Cruz J. (2014). Métodos Electroquímicos Combinados. En C. Barrera (Ed.), Aplicaciones electroquímicas del tratamiento de aguas residuales (p.281), México: Reverte.
- Cano Quiroz, Anaid. (2011). Tratamiento electroquímico-ozono de un efluente industrial. (Tesis de maestría inédita). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38 (1), 11–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- Curteanu, S., Godini, K., Piuleac, C. G., Azarian, G., Rahmani, A. R., & Butnariu, C. (2014). Electro-Oxidation Method Applied for Activated Sludge Treatment: Experiment and Simulation Based on

- Supervised Machine Learning Methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53 (12),4902–4912.  
<https://doi.org/10.1021/ie500248q>
- Eisenberg, G. (1943). Colorimetric Determination of Hydrogen Peroxide. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 15 (5), 327–328.  
<https://doi.org/10.1021/i560117a011>
- ElShafei, G. M. S., Yehia, F. Z., Eshaq, G., & ElMetwally, A. E. (2017). Enhanced degradation of nonylphenol at neutral pH by ultrasonic assisted- heterogeneous Fenton using nano zero valent metals. *Separation and Purification Technology*,178,122–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.028>
- Espinoza-Montero, P. J., Vasquez-Medrano, R., Ibanez, J. G., & Frontana-Uribe, B. A. (2013). Efficient anodic degradation of phenol paired to improved cathodic production of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at BDD electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*,160(7),G3171–G3177.  
<https://doi.org/10.1149/2.027307jes>
- Felis, E., & Miksch, K. (2015). Nonylphenols degradation in the UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and UV/O<sub>3</sub> processes - Comparison of the methods and kinetic study. *Water Science and Technology*, 71(3),446–453.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2015.011>

- García-Morales, M. A., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B. & Rodrigo, M. A. (2012). Synergy of electrochemical oxidation using boron-doped diamond (BDD) electrodes and ozone (O<sub>3</sub>) in industrial wastewater treatment. *Electrochemical Communications*, 27, 34-37.
- Hernández Maya, Francisco. (2011). Tratamiento de aguas residuales industriales empleando oxidación electroquímica, ozonación y cloración para mejorar su calidad y disminuir la toxicidad. (Tesis de licenciatura inédita). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México.
- Kasprzyk-Hordern, B., Ziółek, M., & Nawrocki, J. (2003). Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(4), 639–669. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00326-6](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00326-6)
- Kazemi, S., Mousavi Kani, S. N., Ghasemi-Kasman, M., Aghapour, F., Khorasani, H., & Moghadamnia, A. A. (2016). Nonylphenol induces liver toxicity and oxidative stress in rat. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 479 (1), 17–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.08.164>
- Lepretti, M., Paolella, G., Giordano, D., Marabotti, A., Gay, F., Capaldo, A., ... Caputo, I. (2015).

4-Nonylphenol reduces cell viability and induces apoptosis and ER-stress in a human epithelial intestinal cell line. *Toxicology in Vitro*, 29 (7), 1436–1444.

<https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.04.022>

Ltaïef, A. H., D'Angelo, A., Ammar, S., Gadri, A., Galia, A., & Scialdone, O. (2017). Electrochemical treatment of aqueous solutions of catechol by various electrochemical advanced oxidation processes: Effect of the process and of operating parameters. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 796(February), 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.04.033>

Mao, Z., Zheng, X. F., Zhang, Y. Q., Tao, X. X., Li, Y., & Wang, W. (2012). Occurrence and biodegradation of nonylphenol in the environment. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(1), 491–505.

<https://doi.org/10.3390/ijms13010491>

Metcalf, Eddy (2003). *Wastewater Engineering*, New York U.S.A: Mc Graw Hill

Panizza M. and Cerisola G. (2005) Application of diamond electrodes to electrochemical processes. *Electrochemical*. 51: 191-199.

Peralta J. M., Mendez M., Acero R., Guerra R., Brilla E., (2014). Producción electroquímica de peróxido de hidrógeno y su aplicación en el tratamiento de agua. En C. Barrera (Ed.),

- Aplicaciones electroquímicas del tratamiento de aguas residuales (234-239), México: Reverte.
- Pérez, M. (ca. 2005). Tratamientos Avanzados: el ozono y la reutilización de agua residual. En Pérez. (Editor), Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológica. (pp. 8- 14). Madrid: Congreso Nacional del Medio Ambiente.
- Polcaro, A. M., Vacca, A., Mascia, M., Palmas, S., Pompei, R., & Laconi, S. (2007). Characterization of a stirred tank electrochemical cell for water disinfection processes. *Electrochimica Acta*, 52 (7), 2595–2602. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.09.015>
- Rajkumar, D., & Palanivelu, K. (2003). Electrochemical Degradation of Cresols for Wastewater Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42 (9), 1833–1839. <https://doi.org/10.1021/ie020759e>
- Ramalho R. S. 2003. Tratamiento de aguas residuales. London: REVERTÉ.
- Rodrigo A., Cañizares P.; Llanos J., Lobato J., Martínez F., Sáez C. (2014) .Fundamentos de electroquímica ambiental. En C. Barrera (Ed), Aplicaciones electroquímicas del tratamiento de aguas residuales. México: Reverte.
- Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de

- naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Revista Facultad de Ingeniería*, (46), 24–38.
- Salgot, M., Folch, M., & Unit, S. S. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>
- Song, W., Ravindran, V., & Pirbazari, M. (2008). Process optimization using a kinetic model for the ultraviolet radiation-hydrogen peroxide decomposition of natural and synthetic organic compounds in groundwater. *Chemical Engineering Science*, 63 (12), 3249–3270. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.03.024>
- Tejocote Pérez, M., Balderas Hernández, P., Barrera-Díaz, C. E., Roa Morales, G., & Natividad-Rangel, R. (2010). Treatment of industrial effluents by a continuous system: Electrocoagulation-Activated sludge. *Bioresource Technology*, 101 (20), 7761–7766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.027>

# OXIDACIÓN DE FENOLFTALEÍNA POR UN SISTEMA ELECTROQUÍMICO ACOPLADO CON OZONO

Violeta García Orozco<sup>1</sup>, Gabriela Roa Morales<sup>2</sup>,  
Ivonne Linares Hernández<sup>3</sup>, Carlos Barrera Díaz<sup>2</sup>  
y Reyna Natividad Rangel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). violetamaracruz@gmail.com

<sup>2</sup> Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, UAEMéx-UNAM. gabyroamo@yahoo.com.mx, cebarrerad@uaemex.mx, rnatividadr@uaemex.mx

<sup>3</sup> Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, UAEMéx. ivonnelineares1978@yahoo.com.mx

## 1. Introducción

El agua potable es un derecho humano básico y vital, el cual debe ser seguro y fiable para toda la comunidad. La escasez de agua es una amenaza económica para los países en desarrollo en los que una gran cantidad del recurso hídrico se utiliza en el sector agrícola, industrial y doméstico (Muchara *et al.*, 2014), esto ocasiona que contenga niveles elevados de residuos orgánicos (Davoli *et al.*, 2018).



Por tal motivo, el tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una prioridad, ya que el objetivo es reutilizarla en algunas actividades. En este sentido, los laboratorios químicos generan una gran cantidad de residuos. En particular, el análisis y la prueba de la alcalinidad y acidez en agua producen suficientes cantidades de agua residual que contiene fenolftaleína (PHPH).

La PHPH es un indicador ácido-base ampliamente utilizado, el cual se ioniza en una solución alcalina, que provoca el cambio de color (Çiftçi *et al.*, 2013a) a  $\text{pH} = 8$ . De  $\text{pH} 8$  a  $12.5$  el isómero quinonoide produce el color magenta. A  $\text{pH} < 8$  la PHPH es incolora por la forma de la lactona. Cuando se le agrega ácido/base para modificar el valor del  $\text{pH}$ , la estructura de PHPH se interconvierte entre la forma de lactona y la forma de quinonoide, por esta razón el color de la PHPH cambia entre incoloro y magenta. La eficiencia de este cambio de color es causada por los compuestos fotocromáticos activados por la luz (Jin *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2015). La PHPH ha mostrado ser tóxica y carcinogénica, al realizarse análisis en roedores, por esa razón se prohibió su uso en la década de los noventas (Guo *et al.*, 2012).

Por lo anteriormente expuesto es de preocupación ambiental el estudio y tratamiento de residuos acuosos que contienen PHPH, aplicando

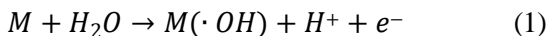
diferentes procesos de oxidación avanzada (POAs) con la finalidad de producir radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), que son agentes oxidantes fuertes, y que reaccionan fácilmente con compuestos orgánicos (Bello y Raman, 2017; Gaḡol *et al.*, 2018; Kanakaraju *et al.*, 2018). A diferencia de muchos otros radicales, los radicales hidroxilo no son selectivos y por lo tanto ataca fácilmente a un gran grupo de productos químicos orgánicos para transformarlos en intermediarios de menor complejidad y de mayor biodegradabilidad.

### *1.1 La electrooxidación*

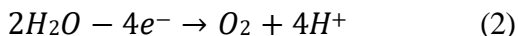
Los procesos de electrooxidación (EO) son opciones prometedoras para la eliminación de contaminantes orgánicos que se encuentren en el agua, mediante la oxidación (Chakchouk *et al.*, 2017). El principal atractivo de estas tecnologías es evitar la adición de reactivos químicos. Pero una limitación importante es que la transferencia de masa lenta reduce la eficiencia (Trellu *et al.*, 2018).

La EO es un proceso de oxidación avanzada, que se basa en la generación de especies altamente oxidantes, como los radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ,  $E^\circ = 2.80 \text{ V/SHE}$ ) (Barbari *et al.*, 2018), los cuales se forman de la oxidación de agua en el ánodo como se describe en la Reacción 1 donde M es la

superficie de material anódico (Reipa *et al.*, 2018). Ellos son capaces de eliminar casi todos los contaminantes orgánicos de forma no selectiva y rápida.



El poder de oxidación del ánodo corresponde al potencial de aparición de la evolución del oxígeno (Tabla 1 Sección II), que ocurre al introducir altos sobrepotenciales (Tabla 1 Sección III) (Reacción 2) (Barrera-Díaz, 2014), mientras mayor sea el sobre potencial el poder de oxidación en el ánodo es más alto (Tabla 1 Sección V), la entalpía de adsorción de los radicales hidroxilo en la superficie del ánodo, ocurre al contrario (Tabla 1 Sección IV).

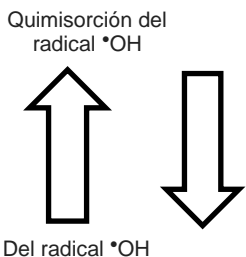


En la EO se puede producir una oxidación directa de los productos químicos tratados u oxidación indirecta. En la oxidación anódica indirecta, es posible la formación de oxidantes fuertes, tales como el ozono, cloro, hipoclorito, y radicales hidroxilos. Recientemente, las técnicas de oxidación anódica (directa o indirecta) se han empleado para eliminar el color o la Demanda

Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales (Rubí-Juárez *et al.*, 2015).

El material del ánodo es uno de los factores más importantes que influyen en la eficacia del tratamiento electroquímico, en los cuales se encuentran Pt, grafito, SnO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub>, PbO<sub>2</sub> y DDB (Tabla 1 Sección I) que han sido investigados para tratar contaminantes orgánicos refractarios (Chen *et al.*, 2018), el poder de oxidación del ánodo corresponde al potencial de aparición de la evolución del oxígeno, es mayor mientras su ventana de potencial sea más amplia.

Tabla1. Poder de Oxidación del material de ánodo en medio ácido

Electrodo (Sección I)	Potencial de oxidación (V) (Sección II)	Sobrepotencial de la evolución de O <sub>2</sub> (V) (Sección III)	La adsorción de la entalpía de M-•OH (Sección IV)	Poder de oxidación del ánodo (Sección V)
RuO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> (DSA-Cl <sub>2</sub> )	1.4-1.7	0.18		
IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (DSA-O <sub>2</sub> )	1.5-1.8	0.25		
Ti/Pt	1.7-1.9	0.3		
Ti/PbO <sub>2</sub>	1.8-2.0	0.5		
Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.9-2.2	0.7		
p-Si/DDB	2.2-2.6	1.3		

Fuente: Comninellis, 2010

Esta técnica tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo el tratamiento de residuos

tóxicos, eliminación de colorantes, plaguicidas, fármacos, fenoles, la eliminación de impurezas orgánicas e inorgánicas en el agua, etc. (Chou *et al.*, 2011).

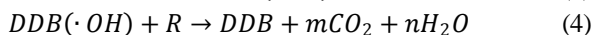
Uno de los materiales recientemente utilizados son los electrodos de diamante dopados con boro, a continuación, se describirán algunas de sus características físicas y químicas.

### *1.1.2 Electrodo de diamante dopado con boro*

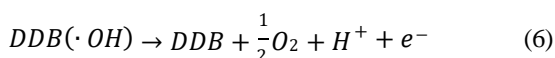
El electrodo de diamante dopado con (DDB) tiene una estabilidad muy alta, gran ventana electroquímica, alta estabilidad, resistencia a la corrosión y superficie inerte (Barrios *et al.*, 2019). Los electrodos de diamante se ha estudiado en la oxidación de contaminantes (Panizza *et al.*, 2008). Los DDB promueven la formación de  $\cdot\text{OH}$ , que son muy reactivos y pueden producir la mineralización de los compuestos orgánicos (Dominguez *et al.*, 2018; Rafaideen *et al.*, 2019). Además, la EO con electrodos de DDB se ha utilizado recientemente para el tratamiento de aguas residuales industriales y la destrucción de contaminantes orgánicos en los efluentes acuosos. Los electrodos DDB exhiben sobrepotenciales muy altos de -1.5 a +2.3 V, superficies inertes con bajas propiedades de adsorción y una estabilidad a la corrosión, incluso

en medios fuertemente ácidos (Rubí-Juárez *et al.*, 2015).

La eliminación de contaminantes por EO con electrodos de DDB se produce por la formación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) en la superficie DDB (Comninellis, 2010), los cuales tienen un alto poder oxidante que degrada a la materia orgánica como se muestra en la reacción (3) (García-Segura *et al.*, 2016; Madsen *et al.*, 2014; Sirés *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013) y genera la evolución del oxígeno. En este proceso existe la posibilidad de llegar a una mineralización completa, donde el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  se forman (Reacción 4 y 5) y el  $\text{CO}_2$  se hidroliza para formar iones de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y/o  $\text{H}_2\text{CO}_3$  dependiendo del pH en que se encuentre la muestra (García-Morales *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2012).



Las reacciones (4) y (5) compiten con la reacción secundaria de la transformación de radicales hidroxilo por  $\text{O}_2$  sin ninguna participación de la superficie del ánodo, como se indica en la reacción (6) (Linares-Hernández *et al.*, 2010):



Algunas otras ventajas de los electrodos de DDB son (Alfaro *et al.*, 2006):

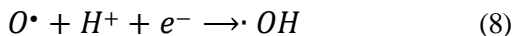
- a) Aún en corrientes bajas, cuentan con una gran ventana de potencial en solución acuosa.
- b) Son durables, de bajo impacto ambiental, tienen alta conductividad térmica, una excelente resistencia al daño por radiación, la superficie es estable y hay poca evidencia de degradación por su actividad electroquímica con el tiempo.
- c) La mineralización electroquímica de compuestos orgánicos es una reacción rápida y está controlada por el transporte de masa de los compuestos orgánicos a la superficie del ánodo.
- d) La adsorción de los compuestos orgánicos en la superficie del electrodo es despreciable.

Otro Proceso de Oxidación Avanzada es la ozonación, donde se utilizan moléculas de O<sub>3</sub> para oxidar la materia orgánica como se muestra a continuación.

## 1.2 Ozonación

El Ozono ( $O_3$ ), es una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, tiene un potencial de oxidación de 2.07 V (Audran *et al.*, 2019).

El  $O_3$  puede ser generado a partir de oxígeno como se muestra en la Reacción 7, puede reaccionar por un mecanismo directo involucrando al  $O_3$  molecular o por un mecanismo indirecto con la participación de diferentes productos intermedios altamente reactivos que se derivan de su descomposición (Lovato *et al.*, 2009; Rivas *et al.*, 2009) como es el radical  $\cdot OH$  (ecuación 8) (Chen, 2004; Hanni *et al.*, 2007):



El  $O_3$  se utiliza en la esterilización de instrumentos médicos, la oxidación y desinfección de aguas residuales y agua de pozo, la limpieza de componentes electrónicos y el tratamiento de alimentos (Okada *et al.*, 2019).

El  $O_3$  se puede utilizar en combinación con otras tecnologías mediante catálisis, radiación y fotocatalisis para producir radicales  $\cdot OH$  (Solís *et al.*, 2019), para el tratamiento de muestras más



complejas de aguas residuales, como es el caso de la molécula de la fenoftaleína (Khadhraoui *et al.*, 2009; Lovato *et al.*, 2009).

### 1.3 Fenolftaleína

La PHPH es un monómero interesante debido a sus diversos grupos funcionales, es decir, fenólico, carboxílico y alcohólico (Al-Kass *et al.*, 1990). Su forma es de un cristal de color amarillo pálido, este compuesto se clasifica como un ácido orgánico sin sabor y olor, sintetizado por primera vez en 1871 por Adolf Von Baeyer, un químico alemán (Saeidnia y Manayi, 2014).

La PHPH es casi insoluble en agua, soluble en alcohol (95%), en éter, en cloroformo, en solución diluida de hidróxidos alcalinos y soluciones calientes de carbonatos alcalinos que forman una solución roja (Sciences y Clrabia, 1991).

La PHPH es un compuesto del anhídrido ftálico con un fenol o derivado fenólico que contiene al grupo funcional lactona. El anhídrido ftálico combinado con dos moléculas de fenol forma el compuesto PHPH como se muestra en la Figura 1.

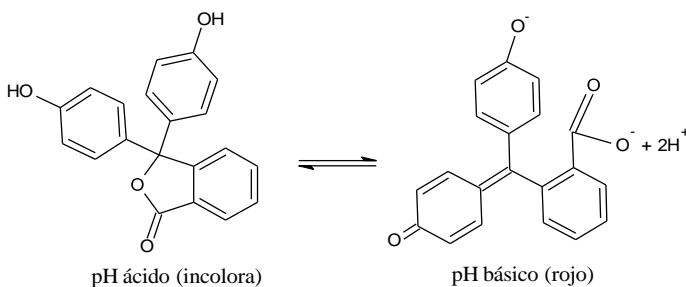
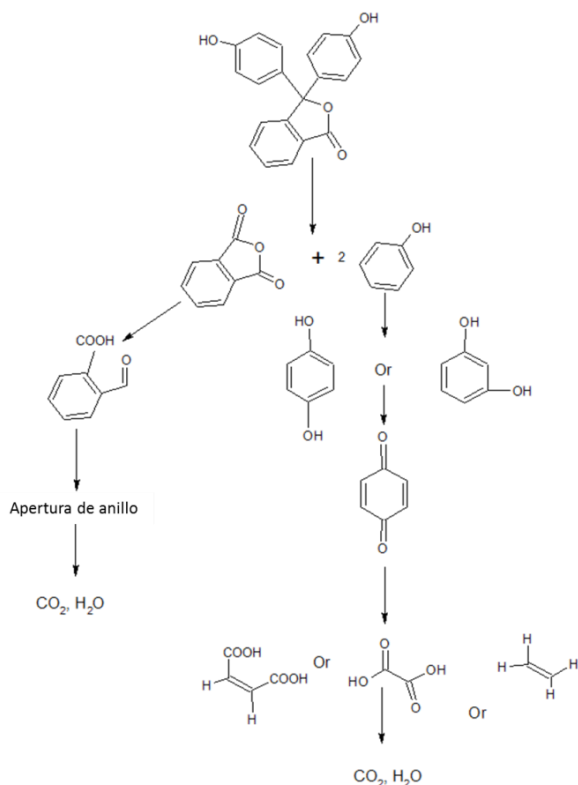


Figura 1. La estructura de PHPH en solución ácida y solución básica

La PHPH existe en forma de lactona incolora a valores de pH inferiores a 8. A medida que el pH aumenta de 8 a 10, generalmente se acepta que la forma de dianión es responsable del color rosado-rojo (Altun *et al.*, 2008). Como se puede ver, la pérdida de protones da como resultado un cambio en la estructura de la molécula como se muestra en la Figura anterior (Silverman y Thompson, 2014). En la Figura 2 se muestra la estructura de la PHPH a pH ácido y su mecanismo de mineralización propuesto para procesos de oxidación avanzados.



Fuente: Garcia-Orozco *et al.*, 2016

Figura 2. Mecanismo propuesto para la mineralización de PHPH

### 1.3.1 Usos

El uso más conocido de la PHPH es en solución alcohólica al 1% para la valoración de soluciones acuosas, como un indicador visual de pH (Jin *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2015; Rong *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2009).

Otro uso de la PHPH es en la prueba de Kastle Meyer utilizada en medicina forense, la cual consiste en determinar la presencia de sangre en muestras, se lleva a cabo agregando PHPH después de esto se agrega una pequeña cantidad de peróxido de hidrógeno. Si la enzima peroxidasa (componente de la sangre) está presente, hace que el peróxido de hidrógeno se descomponga y libere oxígeno, que después reacciona con la PHPH provocando el color rosa oscuro, esto ocurre en unos segundos (Silverman y Thompson, 2014).

La PHPH se encuentra en una amplia variedad de productos ingeridos porque se puede comprimir e incorporar en forma de polvo y líquido debido a ser inodoro e insípido, esta se coloca en alimentos como chocolate de venta libre (Çiftçi *et al.*, 2009), productos para adelgazar, laxantes (Dietz *et al.*, 1992; Eherer *et al.*, 1993; Hutchison, 1936). En 1974 se encontraba en la aspirina (Keith, 1974) y está presente en un pequeño número de medicamentos autorizados en el Reino Unido (Cooper *et al.*, 2000; Petruševski y Risteska, 2007).

La PHPH está médicamente relacionada con el tratamiento de ataque cardíaco, la insuficiencia renal y las enfermedades de Alzheimer (Patel *et al.*, 2017), aunque su inhalación provoca estornudos y tos (Saeidnia y Manayi, 2014).

En la industria se ha utilizado como monómero de bisfenol aromático para la preparación de resinas termoplásticas y termoestables (Çiftçi *et al.*, 2013b).

También se utiliza para determinar la profundidad de carbonatación en el concreto como indicador (Choi *et al.*, 2002).

### *1.3.2 Toxicidad de la fenolfaleína*

Se realizaron pruebas de toxicidad de la PHPH en ratones provocándoles neoplasia y cáncer de ovario en ratones (Choi *et al.*, 2017; Garner *et al.*, 2000; Hedtke *et al.*, 2008). La PHPH se suministró en los ratones macho y hembra, agregándola en su alimentación diaria con la comida y de forma intravenosa (Coogan *et al.*, 2000; Bucher, 1990; Witt *et al.*, 1995).

Existe un caso en el que un paciente presentó pancreatitis aguda después de la ingestión accidental de grandes cantidades de PHPH, la usó para tratar su estreñimiento crónico. Su recuperación fue completa y sin secuelas del ataque agudo de pancreatitis (Lambrianides *et al.*, 1984).

Se evaluaron los resultados del nacimiento de niños con anormalidades congénitas de mujeres que estaban en un tratamiento médico donde consumían PHPH durante el embarazo, se asocia que sus hijos tendrán un mayor riesgo para la enfermedad de

Hirschsprung (obstrucción intestinal) (Bánhidý *et al.*, 2008).

El uso de PHPH en alimentos para adelgazar se prohibió en todo el mundo durante la década de 1990; sin embargo, se está utilizando ilegalmente (Guo *et al.*, 2012) y en el año 1999 (IARC, 2000), en la dirección de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), hicieron que se retiraran todos los laxantes de venta libre que contienen PHPH. La PHPH fue reemplazada en la mayoría de los productos laxantes con el producto natural de *Cassia acutifolia Delile* (Spiller *et al.*, 2003).

Sin embargo, los resultados de las investigaciones con PHPH proporcionan una bandera roja de precaución y por ello es importante su tratamiento antes de ser vertida a las fuentes naturales como hace referencia la ficha de seguridad, la cual sugiere como observación ecológica no incorporarla al suelo ni a los acuíferos. La hoja de seguridad de la PHPH (CTR SCIENTIFIC 2014) indica que es tóxicamente aguda: dosis letal más baja publicada intraperitoneal en ratones DLL<sub>0</sub> ipr rat: 500 mg/kg y según la clasificación realizada por el Reglamento (EC) Número 1272/2008, se sospecha que la PHPH causa defectos genéticos con posibilidad de efectos irreversibles y puede causar cáncer. Este reglamento sustituye a la Directiva 67/548/CEE y a la Directiva 1999/45/CE

(Chinchón-Payá *et al.*, 2016), que ya consideraba esta sustancia.

Los seres humanos pueden estar expuestos a la PHPH a través de diversas vías, tales como la ingestión, contacto dérmico, y la inhalación de aire contaminado (Saeidnia y Manayi, 2014).

Por todo lo anteriormente mencionado en este trabajo tuvo como objetivo la mineralización de PHPH presente en residuos de laboratorio en medio acuoso por la sinergia de dos procesos de oxidación avanzada, la EO y la ozonación.

## **2 Materiales y Métodos**

### *2.1 Productos químicos*

Se utilizó agua destilada, para la preparación de soluciones, se preparó la muestra a una concentración de 5.0 mg/L de PHPH ( $C_{20}H_{14}O_4$ ), teniendo  $Na_2SO_4$  (Fermont) como electrolito soporte a 0.05 M para todos los tratamientos. Se ajustó el pH 3 con  $H_2SO_4$  1.0 M (Fermont). Para ajustar el pH 7 y 9 se necesitó colocar  $NaOH$  5.0 M (Merck), respectivamente y para que estos pH sean constantes al inicio de los tratamientos la muestra contiene  $B(OH)_3$  (JT Baker) y  $H_3PO_4$  (Merck) los dos a una concentración de 0.04M.

## *2.2 Tratamiento acoplado electroquímico-ozono*

El reactor utilizado tiene una longitud de 40 cm, un diámetro de 8 cm, una placa porosa filtrante la cual deja pasar el  $O_3$  y ayuda a retener la muestra en el reactor. Se colocó un litro de solución de PHPH con una concentración 5.0 mg/L (761 mg/ $LO_2$  DQO). Se introdujeron cinco electrodos de DDB, al reactor con una superficie anódica total (Aa) de 321.36  $cm^2$  y se suministró  $O_3$  empleando un generador Pacific Ozone Technology No. LAB212 con número de serie 7646 donde se produce  $5 \pm 0.5$  mg/L promedio de  $O_3$ , el  $O_3$  residual se direcciona a un destructor de  $O_3$  (OZONO PACÍFICO, modelo n. D42202, número de serie 1667).

Los experimentos se llevaron a cabo a pH 3.0, 7.0 y 9.0 con muestras tomadas a intervalos regulares de 10 min, para medir la DQO. Se introdujo  $O_3$  en el reactor al mismo tiempo que se suministraba energía a los electrodos (la densidad de corriente de 6.22 mA/ $cm^2$ ). En la Figura 3 se muestra el sistema de pareja sinérgica.



- a) Fuente de energía directa
- b) Generador de O<sub>3</sub>
- c) Destructor de O<sub>3</sub>
- d) Electrodo de DDB
- e) Reactor de vidrio
- f) Difusores de O<sub>3</sub>

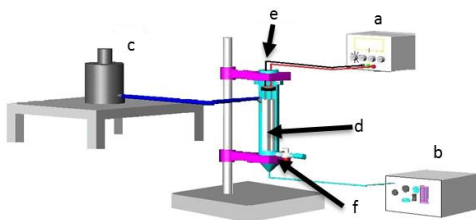


Figura 3. Diagrama esquemático del proceso integrado electroquímico-ozono

### 2.3 Métodos analíticos

Los espectros de UV-Vis se obtuvieron usando un espectrofotómetro DR 5000<sup>TM</sup> UV-Vis Laboratory Spectrophotometer a una longitud de onda de 200 nm a 650 nm.

La concentración de carbono orgánico total (COT) se midió en un analizador de carbono orgánico total Shimadzu (modelo LCPH) equipado con un inyector automático y la demanda química de oxígeno (DQO) se midió de acuerdo con APHA/AWWA/WPCE. Además se calculó el porcentaje de eliminación de DQO (Ecuación 9) (Zhou et al., 2018).

$$\alpha_i = \frac{C_o - C_i}{C_o} \times 100\% \quad (9)$$

La voltamperometría cíclica se realizó utilizando tres electrodos; el electrodo de pasta

de carbono como electrodo de trabajo, una barra de grafito como electrodo auxiliar y un electrodo de referencia Ag/AgCl (3.0 M KCl). Las mediciones electroanalíticas se realizaron con la ayuda en un potenciostato BASi EPSILON versión 1.50.69XP.

El electrodo de pasta de carbono se preparó a partir de una mezcla de polvo de grafito 99.99% grado monocristalino (Alfa AESAR) y aceite de nujol (Fluka) en una proporción 1:1 (600.0 mg: 600.0 mg), para obtener una pasta de fácil manipulación. La pasta resultante se empacó cuidadosamente en un tubo de PVC (0.5 cm de diámetro interno y 3.0 cm de altura) evitando cavidades de aire.

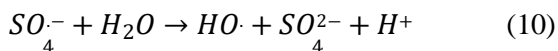
### **3 Resultados y discusión**

#### *3.1 Tratamiento acoplado*

Los procesos de oxidación avanzada como EO y ozonación generan radicales hidroxilo, se acoplaron con la finalidad de incrementar la generación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) y por lo tanto favorecer la mineralización de la materia orgánica (Kolosov *et al.*, 2018).

En el proceso se genera peróxido de hidrógeno, peroxodisulfato y  $\text{O}_3$ . El peroxodisulfato se forma

mediante la oxidación del sulfato y el O<sub>3</sub>. Se generan a partir de la oxidación del agua en el ánodo, el radical SO<sub>4</sub><sup>-</sup> se forma por la reacción entre el peroxodisulfato con los electrones generados en el electrodo como se muestra en la Reacción 10 (Amado-Piña *et al.*, 2017).



Existe un estudio en el cual compararon el proceso de EO y la ozonación para remoción de la PHPH donde la ozonación se lleva a cabo más eficientemente a pH alcalino y la EO a pH ácido (Garcia Orozco *et al.*, 2016) . En la Figura 4a se muestra el comportamiento de la DQO a diferentes pH durante 60 min para el proceso acoplado. La DQO se fue removiendo ascendentemente al pasar el tiempo en los tres diferentes pH, donde es evidente que a pH inicial igual a 3 es más eficiente el tratamiento porque la EO es la que está provocando una mayor remoción y aun que el pH ácido no sea el óptimo para la ozonación ayuda a remover materia orgánica e inorgánica (Amado-Piña *et al.*, 2017). El uso de electrodos de carbono (DDB) como ánodo y cátodo da como resultado la formación de peróxido de hidrógeno, el cual es un agente oxidante que nos permite lograr la remoción de los contaminantes contenidos en el agua. El oxígeno se reduce a peróxido de hidrógeno en el cátodo bajo pH ácidos.

El peróxido de hidrógeno producido puede reaccionar con los radicales hidroxilo en el ánodo para generar radicales hidroperoxilo (Amado-Piña *et al.*, 2017).

A pH 3 se tiene mayor cantidad de producción de radicales  $\cdot\text{OH}$  para mejorar la degradación y mineralización de la PHPH (Rosales *et al.*, 2017). Es importante mencionar que con un tiempo de 60 min de tratamiento no se logra la mineralización completa debido a que la PHPH es disuelta en etanol que también contribuye con la materia orgánica, es por ello que la DQO no tiene cambios significativos.

En la Figura 4b y 4c se muestran los espectros de absorción UV-Vis de la solución acuosa inicial y después de 60 min de tratamiento. Donde se comprueba la oxidación de la PHPH del minuto 0 a 60 min. En la Figura 3 b Se observa que a pH 3 y 7 la banda de absorción de la PHPH con un máximo de absorción en 274 nm y 229 nm, ya no se presentan después del tratamiento, sin embargo, en pH 7 se genera una nueva banda con un máximo de absorción en 204 nm asociada a subproductos de degradación como algunos grupos quininas. Por otro en la Figura 3 c se observa a pH 9 las bandas de absorción de la PHPH en 234 nm, 278 nm y 554 nm (correspondiente a la coloración rosa característica de pH alcalino) después de 10 min de tratamiento el pH es registrado es de 8.81 donde se muestra que la

banda de absorción de 554 nm va disminuyendo de absorbancia, y por lo tanto pierde color la muestra.

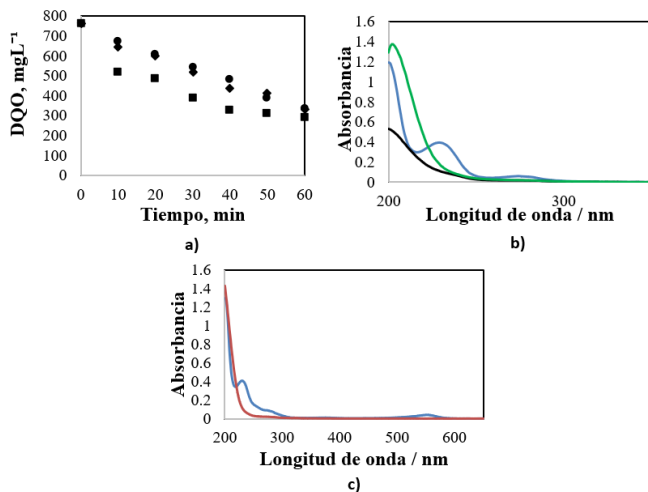


Figura 4. a) Influencia del pH: pH de 3 (■), pH de 7(●), pH de 9 (◆) con respecto a la DQO; b) Espectros UV-vis de PHPH sin tratamiento (línea azul) y las muestras después de ser sometidas al tratamiento que se encontraban inicialmente a pH 3 (línea negra), pH 7 (línea verde); c) Espectros UV-vis de PHPH sin tratamiento (línea azul) y la muestras después del tratamiento a pH 9 (línea naranja) : las muestra después de 60 min de tratamiento acoplado a una densidad de corriente de  $6.224 \text{ mAcm}^{-2}$  y  $5 \pm 0.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_3$

Es importante mencionar que pH a los 3 pH de trabajo se obtuvo una excelente remoción de color, sin embargo, a pH = 3 se considera la mejor condición de tratamiento debido a que se tiene mejor remoción DQO ya que al minuto 40 alcanza un 50 % mientras los otros pH lo alcanzan hasta el minuto 60.

La Figura 5 muestra la remoción de la PHPH a pH 3 a una densidad de corriente de  $6.224 \text{ mA/cm}^2$  y  $5 \pm 0.5 \text{ mg/L O}_3$ , utilizando como parámetro de medición el COT. Donde se obtuvo un 32% con el tratamiento acoplado, esto a 60 min de tratamiento.

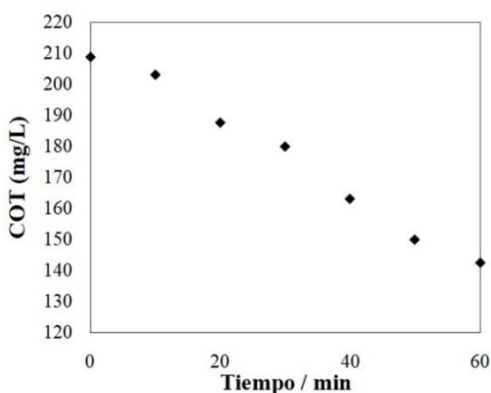


Figura 5. Gráfico de COT en función del tiempo a pH 3 a una densidad de corriente de  $6.224 \text{ mA/cm}^2$  y  $5 \pm 0.5 \text{ mg/L O}_3$

En la Figura 6 se observa que al aumentar el tiempo de tratamiento hasta 120 min es posible alcanzar la mineralización completa de la PHPH, obteniendo una concentración final de DQO de  $0.7 \text{ mg/L}$ , con las condiciones antes mencionadas.

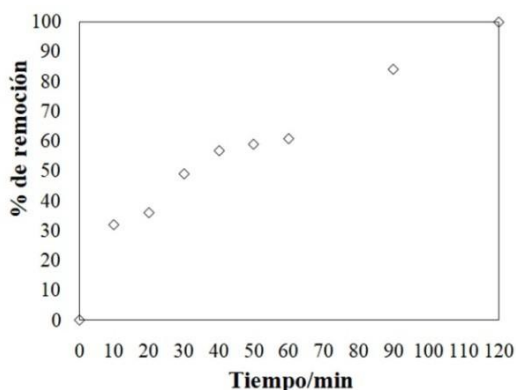


Figura 6. Gráfico de % de Remoción en función del tiempo.  
Prolongación de tratamiento acoplado

### 3.2 Voltamperometría cíclica

En la Figura 7 se muestran el análisis de la voltamperometría cíclica de la PHPH antes y después de cada tratamiento utilizando un EpC (potencial del pico catódico) e iniciando el barrido hacia potenciales positivos. Los tratamientos se realizaron durante 60 min; el tratamiento de ozonación fue a pH 9 con un flujo constante de  $5 \pm 0.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_3$  que removió un 10% de COT, el tratamiento EO a pH de 3 a una densidad de corriente de  $6.22 \text{ mAcm}^{-2}$  este tratamiento removió un 21% de COT y el tratamiento acoplado a pH 3 con la misma densidad de corriente que el tratamiento EO removió un 32% de COT y con el mismo flujo constante que el tratamiento de ozonación.

Para esto se utilizó una solución de sulfato de sodio 0.05 M con un programa de exploración sucesiva en el intervalo de 1.5 a -0.5 V a una velocidad de barrido de 100 mV/s, a partir del potencial de corriente nula ( $E_{i=0}$ )=0 mV en la dirección anódica.

El voltamperograma de la PHPH (línea azul) presenta una onda de oxidación en 0.981 V que se sugieren ocurrió por la oxidación de los grupos OH de la molécula de PHPH ya que son los más disponibles de oxidar. En este mismo voltamperograma se visualizaron dos ondas de reducción, la primera se registra en 0.514 V y la segunda en 0.0044 V que se asociaron con la lactona porque es el grupo más susceptible a la reducción.

Para la muestra tratada electroquímicamente (línea amarilla), se observan dos ondas de oxidación una en 0.978 V y 1.32V asociadas a los subproductos de degradación de la PHPH, los cuales pueden ser especies químicas con grupos OH ya que en la reducción no se observó.

Por otro lado, los voltamperogramas cíclicos de los tratamientos de O<sub>3</sub> (línea roja) y el sistema acoplado (línea gris), solo presentaron una onda de oxidación en 1.22 V asociado a la degradación total de la molécula de PHPH. En el caso del O<sub>3</sub> es probable que muchos subproductos no tengan propiedades electroactivas ya que la DQO aún es



muy alta, en comparación con el tratamiento acoplado y EO. Y en el caso del proceso acoplado la onda de oxidación en ese punto ligeramente disminuida debido a que son menos subproductos.

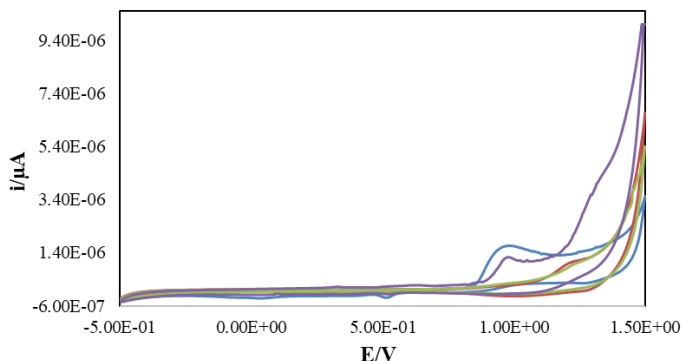


Figura 7. Voltamperograma cíclico para las muestras obtenidas después de 60 min de cada tratamiento; muestra con PHPH 5 mg/L (línea azul), tratamiento electroquímico (línea morada), ozono (línea roja), y por último se encuentra electroquímico-ozono (línea verde)

### *3.3 Tratamiento acoplado para residuos de fenoltaleína*

Los residuos de la PHPH fueron adquiridos de un laboratorio de química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), en donde se utiliza este indicador en titulaciones. Para ello se sometieron los residuos de PHPH en el sistema acoplado a las mejores condiciones de operaciones que se obtuvieron de Figura 3a. Los cuales fueron tratados a pH de 12 (pH de la muestra). En la Figura

8 se muestran los espectros de absorción a diferentes tiempos donde la muestra sin tratamiento presenta una absorbancia en 560 nm por la coloración que tiene la muestra, la cual es removida después de los 10 min de tratamiento. Esto demostró que el tratamiento fue eficiente de la misma forma que en los experimentos de solución acuosa. En los primeros 30 min se aprecia que la PHPH ha sido oxidada casi en su totalidad.

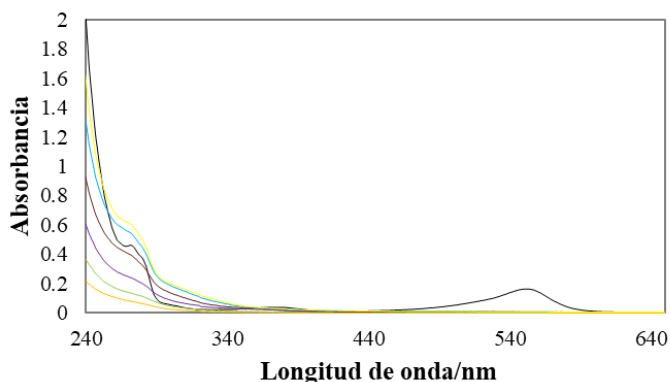


Figura 8. Espectros de UV-Vis de los residuos de laboratorio en el tratamiento acoplado a pH 12; 0 minuto (línea negra), 10 min (línea amarillo claro), 20 min (línea azul), 30 min (línea marrón), 40 min (línea morada), 50 min (línea verde) y 60 min (línea amarillo oscuro)

A continuación, se muestra la Figura 9 donde se llegó a la mineralización completa de los residuos de laboratorio (971mg/L de DQO), después de 180 min se llegó al 100 % de remoción con respecto a la DQO.

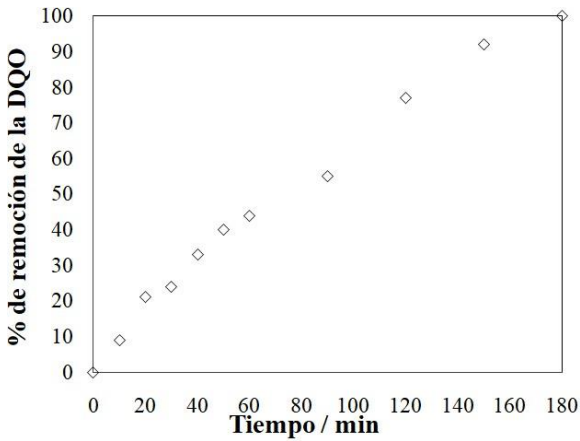


Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO de los residuos de laboratorio sometidos al tratamiento acoplado a pH 12 con respecto al tiempo

Las Figuras 10 y 11 muestran el comportamiento de los residuos de laboratorio de cada tratamiento a sus condiciones óptimas. Para lo cual se analizó la remoción de DQO (con una concentración inicial 477mg/L) y la absorbancia por UV-Vis durante 120 horas, donde la concentración es aproximadamente la mitad que el tratamiento anterior, esto hace que la remoción sea en menos tiempo y por su pH inicial que es 3 que es el óptimo. Estos resultados son confirmados mediante la espectroscopia UV-Vis.

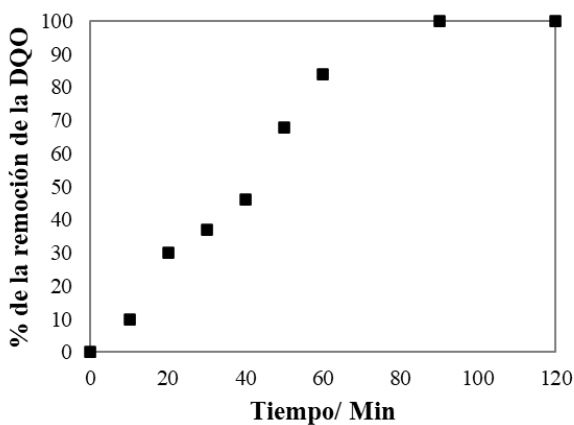


Figura 10. Electroquímico-ozono para residuos de laboratorio a pH 3

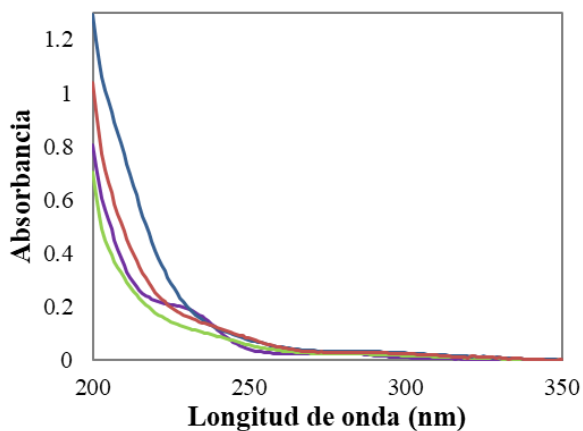


Figura 11. Absorbancia del tratamiento electroquímico-ozono a pH 3 diferentes tiempos 0 min (línea morada) 20 min (línea verde) 40 min (línea azul) 60 min (línea naranja)

## 4 Conclusiones

El tratamiento acoplado remueve una 32%, la EO el 21% y la ozonación 10% de COT, esto demuestra que con respecto al COT y a la voltamperometría cíclica el tratamiento acoplado es más eficiente que cuando se llevan individualmente la EO y la ozonación.

La PHPH muestra un color magenta a pH 9, que desaparece después de 10 min en el tratamiento acoplado; esto se verificó con el espectro UV-Vis en una longitud de onda de 554 nm.

El tratamiento acoplado fue eficiente para tratar residuos de laboratorio a pH básico y ácido, donde se observó que a mayor concentración de DQO inicial la velocidad de reacción disminuye.

## Referencias

- Al-Kass, S. S., Adam, G. A., & Kalaf, M. N. (1990). Synthesis and curing study of a new phenolphthalein-formaldehy de resin. *Thermochimica Acta*, 165(2), 153–161.  
[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(90\)80215-K](https://doi.org/10.1016/0040-6031(90)80215-K)
- Alfaro, M. A. Q., Ferro, S., Martínez-Huitile, C. A., & Vong, Y. M. (2006). Boron doped diamond electrode for the wastewater treatment. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17(2), 227–236.  
<https://doi.org/10.1590/S0103-50532006000200003>

- Altun, S., Altındal, A., Riza Özkaya, A., Bulut, M., & Bekaroğlu, Ö. (2008). Synthesis, characterization, electrochemical and CO<sub>2</sub>sensing properties of novel mono and ball-type phthalocyanines with four phenolphthalein units. *Tetrahedron Letters*, 49 (29–30), 4483–4486. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2008.05.065>
- Alves, S. A., Ferreira, T. C. R., Sabatini, N. S., Trientini, A. C. A., Migliorini, F. L., Baldan, M. R., ... Lanza, M. R. V. (2012). A comparative study of the electrochemical oxidation of the herbicide tebuthiuron using boron-doped diamond electrodes. *Chemosphere*, 88 (2), 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.042>
- Amado-Piña, D., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C., Balderas-Hernandez, P., Romero, R., Martín del Campo, E., & Natividad, R. (2017). Synergic effect of ozonation and electrochemical methods on oxidation and toxicity reduction: Phenol degradation. *Fuel*, 198,82–90. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.117>
- Audran, G., Marque, S. R. A., & Santelli, M. (2018). Ozone, chemical reactivity and biological functions. *Tetrahedron*, 74(43), 6221–6261. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2018.09.023>
- Bánhidý, F., Ács, N., Puhó, E. H., & Czeizel, A. E. (2008). Phenolphthalein treatment in pregnant women and congenital abnormalities in their offspring : A population-based case-control study, 2(6), 357–367.

- Barbari, K., Delimi, R., Benredjem, Z., Saaidia, S., Djemel, A., Chouchane, T., ... Oturan, M. A. (2018). Photocatalytically-assisted electrooxidation of herbicide fenuron using a new bifunctional electrode  $\text{PbO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Ti}/\text{TiO}_2$ . *Chemosphere*, 203, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.126>
- Barrera Díaz, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residual* (Reverte Ed). México D.F.
- Barrios, J. A., Solís-Caballero, F. E., Cano, A., Durán, U., Orozco, G., & Rivera, F. F. (2019). Two-phase hydrodynamic modelling and experimental characterization in an activated sludge electrooxidation flow reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.005>
- Bello, M. M., & Abdul Raman, A. A. (2017). Trend and current practices of palm oil mill effluent polishing: Application of advanced oxidation processes and their future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 198, 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.050>
- Chakchouk, I., Elloumi, N., Belaid, C., Mseddi, S., Chaari, L., & Kallel, M. (2017). A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for dairy wastewater. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 109–117. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150040>
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in

- wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38 (1), 11–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- Chen, Y., Tu, Y., Bai, Y., Li, J., & Lu, J. (2018). Electrosorption enhanced electrooxidation of a model organic pollutant at 3D SnO<sub>2</sub>-Sb electrode in superimposed pulse current mode. *Chemosphere*, 195, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.074>
- Chinchón-Payá, S., Andrade, C., & Chinchón, S. (2016). Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. *Cement and Concrete Research*, 82, 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.010>
- Choi, J. Il, Lee, Y., Kim, Y. Y., & Lee, B. Y. (2017). Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution. *Construction and Building Materials*, 154, 451–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.205>
- Chou, W. L., Wang, C. T., & Chang, C. P. (2011). Comparison of removal of Acid Orange 7 by electrooxidation using various anode materials. *Desalination*, 266 (1–3), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.027>
- Çiftçi, G. Y., Durmuş, M., Şenkuytu, E., & Kiliç, A. (2009). Structural and fluorescence properties of phenolphthalein bridged cyclotriphosphazatrienes. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 74 (4), 881–886. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2009.08.028>



- Çiftçi, G. Y., Senkuytu, E., Durmus, M., & Kiliç, A. (2013a). Nucleophilic substitution reactions of phenolphthalein with different substituted cyclotriphosphazene derivatives. *Polyhedron*, *63*, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2013.07.006>
- Çiftçi, G. Y., Senkuytu, E., Durmus, M., & Kiliç, A. (2013b). Nucleophilic substitution reactions of phenolphthalein with different substituted cyclotriphosphazene derivatives. *Polyhedron*, *63*, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2013.07.006>
- Comninellis, C. (2010). *Electrochemistry for the Environment* (Primera Ed). New York Dordrecht Heidelberg London: Guohua Chen, Springer.
- Coogan, P. F., Palmer, J. R., Strom, L., Zauber, A. G., Paul, D., & Shapiro, S. (2000). Phenolphthalein Laxatives and Risk of Cancer, *92* (23).
- Cooper, G. S., Longnecker, M. P., Sandler, D. P., & Ness, R. B. (2000). Risk of ovarian cancer in relation to use of phenolphthalein-containing laxatives, *83*, 404–406.
- CTR, S. (n.d.). Hoja De Datos De Seguridad Iloxan®. Retrieved August 10, 2014, from <http://www.ctr.com.mx/pdfcert/Fenolfthaleina.pdf>.
- Davoli, E., Zuccato, E., & Castiglioni, S. (2018). Illicit drugs in drinking water. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.004>
- Dietz, D. D., Elwell, M. R., Chapin, R. E., Shelby, M. D., Thompson, M. B., Filler, R., & Stedham, M. A. (1992). Subchronic (13-week) toxicity studies of Oral phenolphthalein in fischer 344 rats

- and B6C3F1 mice. *Toxicological Sciences*, 18(1), 48–58. <https://doi.org/10.1093/toxsci/18.1.48>
- Dominguez, C. M., Oturan, N., Romero, A., Santos, A., & Oturan, M. A. (2018). Lindane degradation by electrooxidation process: Effect of electrode materials on oxidation and mineralization kinetics. *Water Research*, 135, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.037>
- Eherer, A. J., Ana, C. A. S., Porter, J., & Fordtran, J. S. (1993). Effect of psyllium, calcium polycarboxylate, and wheat bran on secretory diarrhea induced by phenolphthalein. *Gastroenterology*, 104 (4), 1007–1012. [https://doi.org/10.1016/0016-5085\(93\)90267-G](https://doi.org/10.1016/0016-5085(93)90267-G)
- Gągól, M., Przyjazny, A., & Boczkaj, G. (2018). Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. *Chemical Engineering Journal*, 338 (January), 599–627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- García-Morales, M. a., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B., & Rodrigo, M. a. (2013). Synergy of electrochemical oxidation using boron-doped diamond (BDD) electrodes and ozone (O<sub>3</sub>) in industrial wastewater treatment. *Electrochemistry Communications*, 27, 34–37. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2012.10.028>
- García-Segura, S., Lima, Á. S., Cavalcanti, E. B., & Brillas, E. (2016). Anodic oxidation, electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradations of pyridinium- and imidazolium-based ionic liquids in waters using a BDD/air-

- diffusion cell. *Electrochimica Acta*.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.057>
- Garcia Orozco, V. M., Barrera Diaz, C. E., Roa Morales, G., & Linares Hernandez, I. (2016). A Comparative Electrochemical-Ozone Treatment for Removal of Phenolphthalein. *Journal of Chemistry*, 2016.  
<https://doi.org/10.1155/2016/8105128>
- Garner, C. E., Matthews, H. B., & Burka, L. T. (2000). Phenolphthalein metabolite inhibits catechol-O-methyltransferase-mediated metabolism of catechol estrogens: A possible mechanism for carcinogenicity. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 162 (2), 124–131.  
<https://doi.org/10.1006/taap.1999.8830>
- Guo, Z., Hao, T., Shi, L., Gai, P., Duan, J., Wang, S., & Gan, N. (2012). A highly sensitive electrochemiluminescence method combined with molecularly imprinted solid phase extraction for the determination of phenolphthalein in drug, slimming food and human plasma. *Food Chemistry*, 132 (2), 1092–1097.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.056>
- Hanni, W., Perret, A., Blaschke, M., Kraft, A., Troster, I., Fryda, M., ... Stadelmann, M. (2007). Electrochemical advanced oxidation process for water treatment using, 11, 640–645.
- Hedtke, B., Gao, Z., Chen, L. J., Weber, W. M., & Dix, K. J. (2008). Metabolism and disposition of [14C]5-amino-o-cresol in female F344 rats and B6C3F1 mice. *Xenobiotica*, 38(2), 171–184.  
<https://doi.org/10.1080/00498250701744666>

- Hutchison, R. (1936). Treatment in general practice. Constipation. *British Medical Journal [Br Med J]* 1936 Feb 22; Vol. 1 (3920); Pp. 374-5., 1, 374–375. Retrieved from <http://ehis.ebscohost.com.ezproxy.endeavour.edu.au:2048/eds/detail?sid=731f44da-6965-466b-854c-57c2db87033f%40sessionmgr14&vid=1&hid=3&bdata=JnNpdGU9ZWRzLWxpdmU%3D#db=mdc&AN=20779776>
- IARC. (2000). Monographs on the Evaluation of carcinogenic risks to Humans. Carcinogenic Risks to Humans. International Agency for Research on Cancer. World Health Organization. Volumen 76. Retrieved September 20, 2015, from <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol76/mono76-15.pdf>
- J.R. Bucher. (1990). TOXICOLOGY AND CARCINOGENESIS STUDIES OF IN F344 / N RATS AND B6C3FI MICE ( DRINKING WATER STUDIES ). *National Toxicology Program*, (393). Retrieved from <http://fluoridealert.org/wp-content/uploads/ntp-1990.pdf>
- Jaafarzadeh, N., Ghanbari, F., & Zahedi, A. (2018). Coupling electrooxidation and Oxone for degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) from aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 22(November 2017),203–209. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.020>
- Jin, P., Cao, F., & Luo, Q. (2016). Multi-responsive diarylethene-phenolphthalein hybrids by multiple

- stimuli. *Tetrahedron*, 72 (35), 5488–5494.  
<https://doi.org/10.1016/j.tet.2016.07.038>
- Kan, C. wai, Cheung, H. fu, & Chan, Q. (2014). A study of plasma-induced ozone treatment on the colour fading of dyed cotton. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3514–3524.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.100>
- Kanarakaju, D., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2018). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review. *Journal of Environmental Management*, 219, 189–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103>
- Keith, R. C. Mac. (1974). PHENOLPHTHALEIN IN "ASPIRIN", 1974.
- Khadhraoui, M., Trabelsi, H., Ksibi, M., Bouguerra, S., & Elleuch, B. (2009). Discoloration and detoxification of a Congo red dye solution by means of ozone treatment for a possible water reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 974–981.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.060>
- Khuntia, S., Majumder, S. K., & Ghosh, P. (2014). Quantitative prediction of generation of hydroxyl radicals from ozone microbubbles. *Chemical Engineering Research and Design*, 8,231–239.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.04.003>
- Kolosov, P., Peyot, M. L., & Yargeau, V. (2018). Novel materials for catalytic ozonation of wastewater for disinfection and removal of micropollutants. *Science of the Total Environment*,644,1207–1218.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.022>  
Lambrianides, A. L., Ed, F. R. C. S., & Rosin, R. D. (1984). Acute pancreatitis complicating excessive intake of phenolphthalein, (July), 491–492.
- Linares-Hernández, I., Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B., Juárez-García Rojas, P., & Campos-Medina, E. (2010). A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 688–694.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.064>
- Liu, L., Wang, Y., Fan, D., & Mi, Y. (2015). Using phenolphthalein as a promising indicator to monitor the vacuum freeze-drying process. *Materials Letters*, 139, 245–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.047>
- Lo, Y., & Lee, H. M. (2002). Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*, 37 (5), 507–514.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00052-X)
- Lovato, M. E., Martín, C. A., & Cassano, A. E. (2009). A reaction kinetic model for ozone decomposition in aqueous media valid for neutral and acidic pH. *Chemical Engineering Journal*, 146, 486–497.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.11.001>
- Madsen, H. T., Søgaard, E. G., & Muff, J. (2014). Study of degradation intermediates formed during electrochemical oxidation of pesticide residue 2,6-dichlorobenzamide (BAM) at boron doped

- diamond (BDD) and platinum-iridium anodes. *Chemosphere*,109,84–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.020>
- Muchara, B., Ortmann, G., Mudhara, M., & Wale, E. (2014). Irrigation water value for potato farmers in the Mooi River Irrigation Scheme of KwaZulu-Natal, South Africa: A residual value approach. *Agricultural Water Management*,164,243–252.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.022>
- Nakada, L. Y. K., Franco, R. M. B., Fiuza, V. R. da S., Santos, L. U. dos, Branco, N., & Guimarães, J. R. (2019). Pre-ozonation of source water: Assessment of efficacy against *Giardia duodenalis* cysts and effects on natural organic matter. *Chemosphere*,764–770.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.164>
- Okada, F., Nagashima, K., & Kobayashi, T. (2019). Production of 160 mg/L ozone water using circulating water electrolysis system. *Electrochimica Acta*, 294, 391–397.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.10.055>
- Panizza, M., Brillas, E., & Comninellis, C. (2008). Application of Boron-Doped Diamond Electrodes for Wastewater Treatment. *J. Environ. Eng. Manage.*, 18(3), 139–153. Retrieved from [http://ser.cienve.org.tw/download/18-3/jeeam18-3\\_139-153.pdf](http://ser.cienve.org.tw/download/18-3/jeeam18-3_139-153.pdf)
- Patel, B. K., Dasmandal, S., & Mahapatra, A. (2017). Unraveling the binding of phenolphthalein with serum protein and releasing by  $\beta$ -cyclodextrin. *Journal of Molecular Liquids*, 244,330–339.

- <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.09.027>  
Petruševski, V. M., & Risteska, K. (2007). Behaviour of phenolphthalein in strongly basic media. *Chemistry*, *16*(4), 259–265.
- Rafaideen, T., Baranton, S., & Coutanceau, C. (2019). Highly efficient and selective electrooxidation of glucose and xylose in alkaline medium at carbon supported alloyed PdAu nanocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, *243*, 641–656.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.11.006>
- Reipa, V., Atha, D. H., Coskun, S. H., Sims, C. M., & Nelson, B. C. (2018). Controlled potential electro-oxidation of genomic DNA. *PLoS ONE*, *13*(1), 1–18.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190907>
- Rivas, J., Gimeno, O., & Beltrán, F. (2009). Wastewater recycling: Application of ozone based treatments to secondary effluents. *Chemosphere*, *74*(6), 854–859.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.090>
- Rong, L., Kojima, Y., Koda, S., & Nomura, H. (2001). Simple quantification of ultrasonic intensity using aqueous solution of phenolphthalein. *Ultrasonics Sonochemistry*, *8*(1), 11–15. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(00\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(00)00024-9)
- Rosales Landeros, C., Barrera Díaz, C. E., Amaya Cháves, A., & Roa Morales, G. (2017). Evaluation of a coupled system of electro-oxidation and ozonation to remove the pesticide Thiodan® 35 CE (endosulfan) in aqueous



- solution. *Fuel*, 198, 91–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.031>
- Rubí-Juárez, H., Barrera-Díaz, C., Linares-Hernández, I., Fall, C., & Bilyeu, B. (2015). A combined electrocoagulation-electrooxidation process for carwash wastewater reclamation. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(8), 6754–6767.
- Saeidnia, S., & Manayi, A. (2014). Phenolphthalein. *Encyclopedia of Toxicology*, 3, 877–880.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01136-2>
- Sciences, C. M., & Clrabia, S. (1991). Clinical Laboratory Sciences Department, College, 20.
- Silverman, M., & Thompson, T. (2014). *Written in Blood* (First).
- Sirés, I., Brillas, E., Cerisola, G., & Panizza, M. (2008). Comparative depollution of mecoprop aqueous solutions by electrochemical incineration using BDD and PbO<sub>2</sub> as high oxidation power anodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 613(2), 151–159.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2007.10.023>
- Solís, R. R., Medina, S., Gimeno, O., & Beltrán, F. J. (2019). Solar photolytic ozonation for the removal of recalcitrant herbicides in river water. *Separation and Purification Technology*, 212, 280–288.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.035>
- Spiller, H. a., Winter, M. L., Weber, J. a., Krenzlok, E. P., Anderson, D. L., & Ryan, M. L. (2003). Skin breakdown and blisters from senna-

- containing laxatives in young children. *Annals of Pharmacotherapy*, 37(5), 636–639. <https://doi.org/10.1345/aph.1C439>
- Trellu, C., Chaplin, B. P., Coetsier, C., Esmilaire, R., Cerneaux, S., Causserand, C., & Cretin, M. (2018). Electro-oxidation of organic pollutants by reactive electrochemical membranes. *Chemosphere*, 208, 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.026>
- Witt, K. L., Gulati, D. K., Kaur, P., & Shelby, M. D. (1995). Phenolphthalein: induction of micronucleated erythrocytes in mice. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 341(3), 151–160. [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(95\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0165-1218(95)90005-5)
- Zhang, C., Jiang, Y., Li, Y., Hu, Z., Zhou, L., & Zhou, M. (2013). Three-dimensional electrochemical process for wastewater treatment: A general review. *Chemical Engineering Journal*, 228, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.033> Review
- Zhang, L., Li, Z., Chang, R., Chen, Y., & Zhang, W. (2009). Synthesis and characterization of novel phenolphthalein immobilized halochromic fiber. *Reactive and Functional Polymers*, 69 (4), 234–239. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2009.01.001>
- Zhou, X., Yin, J., Chen, Y., Xia, W., Xiang, X., & Yuan, X. (2018). Hydrometallurgy Simultaneous removal of sulfur and iron by the seed precipitation of digestion solution for high-sulfur bauxite. *Hydrometallurgy*, 181(February), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.08.014>



# **SEDIMENTACIÓN AVANZADA DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES A TRAVÉS DE LA ELECTRODISOLUCIÓN DE IONES DE COBRE**

Monserrat Ballesteros Balbuena<sup>1</sup>, Patricia Balderas  
Hernández<sup>1</sup>, Gabriela Roa Morales<sup>1</sup>  
y Carlos Eduardo Barrera Díaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable,  
UAEMéx-UNAM.mballesterosb039@profesor.uaemex.mx,  
pbalderash@uaemex.mx, gabyroam@gmail.com,  
cebarrerad@uaemex.mx

## **1. Introducción**

La escasez de agua es un problema global. El crecimiento poblacional y la industrialización generan volúmenes muy grandes de aguas residuales que muchas veces se descargan en cuerpos de agua (Ramalho, 1996; Mittal, 2011; Moussa *et al.*, 2017). Para resolver esta problemática se han establecido plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales consisten en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para la eliminación de contaminantes. Los procesos de descontaminación de estas plantas

no han cambiado por mucho tiempo, es por esto que se están volviendo ineficientes. El alto consumo de energía, tiempos extendidos de tratamiento, así como la baja capacidad de operación, son algunas de las desventajas (Martinez-Huitle y Ferro, 2006). Otro inconveniente es su diseño, los procesos unitarios de las plantas se basan en la remoción de materia orgánica en aguas residuales municipales, por lo tanto, son poco efectivos en otro tipo de aguas residuales. Esto ha conducido a estudiar tecnologías de tratamiento que puedan eliminar varios contaminantes (Symonds *et al.*, 2015). En este sentido, la electrocoagulación (EC) es una técnica que se ha aplicado en el tratamiento de aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales de composición variada, así como agua para consumo humano (Ilhan *et al.*, 2008, Bazrafshan *et al.*, 2012a; Hossain *et al.*, 2013; Barrera-Díaz *et al.*, 2014; Al-Shannag *et al.*, 2015). Esto muestra que la EC es una técnica robusta que puede aplicarse para tratar diversos contaminantes.

La electrocoagulación se basa en la producción electroquímica de iones metálicos, principalmente hierro y aluminio, que forman agregados con los contaminantes, lo que causa su remoción por precipitación (Martinez-Huitle y Ferro, 2006; Hossain *et al.*, 2013; Barrera-Díaz *et al.*, 2014). El proceso se caracteriza por su facilidad de operación,

y por una baja producción de lodos debido a la generación *in situ* de los coagulantes.

Recientemente, se ha explorado la posibilidad de usar otros metales para la EC, tales como el cobre. Varios estudios han reportado el efecto catalítico del cobre en la degradación de ácidos carboxílicos (Pi *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2012; Al-Shannag *et al.*, 2015). Además, este metal tiene la propiedad de actuar como agente antimicrobiano. Se ha señalado su capacidad bactericida sobre diversos microorganismos (Gould *et al.*, 2009; Ren *et al.*, 2009; Grass *et al.*, 2011; Ochoa-Herrera *et al.*, 2011; Petre *et al.*, 2015). Otra característica importante, es que se puede aplicar EC con cobre sin la necesidad de modificar el valor de pH que presentan las aguas residuales y aguas superficiales (Ben-Sasson *et al.*, 2013; Ali *et al.*, 2013). También se sabe que el tiempo de sedimentación de un agua tratada con cobre se reduce significativamente a valores de pH cercanos a 8. Lo cual ocurre por la formación de flóculos grandes de hidróxidos de cobre que remueven los contaminantes y precipitan más rápido debido a su mayor masa (Prajapati *et al.*, 2016). Por lo tanto, el objetivo del trabajo fue el tratamiento de aguas residuales municipales a través de la electrodisolución de iones de cobre para reducir la carga orgánica del efluente. La evaluación de cambios en la calidad del agua tratada se determinó

midiendo parámetros como el color, turbidez, conductividad eléctrica, pH, DQO y concentración de Cu (II).

## **2. Materiales y Métodos**

### *2.1 Muestras de agua residual municipal*

Las muestras de agua residual municipal se colectaron en la planta de tratamiento situada en el Estado de México, México. El agua residual se tomó del colector que se ubica después de las rejillas de desbaste. Se colectaron muestras de 10 L en recipientes de polietileno e inmediatamente se transportaron al laboratorio para mantenerse en refrigeración a 4°C para su posterior caracterización.

### *2.2 Reactor de electrocoagulación*

El reactor de electrocoagulación fue una columna cilíndrica de acrílico (0.6 m x 0.24 m). En la figura 1, se presenta el sistema de electrocoagulación que se empleó durante la experimentación. Se usaron dos electrodos de cobre (ánodo y cátodo), cada uno integrado por seis placas de 0.07 m x 0.04 m, y se colocaron en un arreglo monopolar en paralelo. La densidad de corriente aplicada fue de 11.9 mA/cm<sup>2</sup>. El volumen de agua que se trató fue de 3 L. Para

aumentar la conductividad del agua residual se adicionó  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.01 M. El tratamiento electroquímico se hizo con un tiempo de residencia hidráulica de 1 hora.

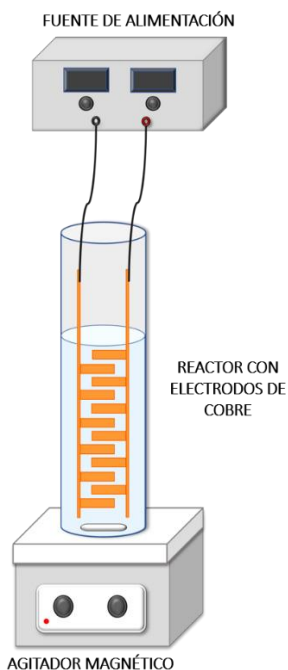


Figura 1. Esquema del reactor de electrocoagulación con electrodos de cobre

### 2.3 Métodos de análisis

El monitoreo de la calidad del agua se hizo en muestras de agua residual cruda y agua tratada utilizando los métodos estándar para cada análisis



(Clesceri *et al.*, 1998). Los parámetros evaluados fueron los siguientes: color, turbidez, pH, conductividad eléctrica. El análisis de DQO se hizo con un método que utiliza  $\text{H}_2\text{O}_2$  como oxidante (en lugar de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) en presencia de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  como catalizador y  $\text{HgSO}_4$  como inhibidor de haluros (Carbajal-Palacios *et al.*, 2012).

#### 2.4 Espectrofotometría UV-Vis

Se usó espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis Perkin-Elmer 25) para monitorear cambios en la absorbancia del agua residual durante la reacción. Se tomaron muestras de agua a intervalos de tiempo establecidos. Los espectros se obtuvieron dentro del intervalo de longitud de onda de 200-900 nm.

#### 2.5 Mediciones $\text{SUVA}_{254}$

Para determinar la absorbancia específica a 254 nm ( $\text{SUVA}_{254}$ ) se utilizó un espectrofotómetro ultravioleta-visible (UV-Vis Perkin-Elmer 25). El contenido de carbono orgánico se cuantificó usando el analizador Shimadzu de la serie TOC-L. La  $\text{SUVA}_{254}$  se calculó normalizando la absorbancia a 254 nm con la concentración del carbono orgánico disuelto y multiplicando el valor por 100 (Baes y Mesmer, 1986).

## *2.6 Especies de cobre en solución acuosa*

Se utilizó el software “MEDUSA” para crear el diagrama de distribución de especies de cobre en solución acuosa en función del pH (Puigdomenech, 1997). Para la elaboración del diagrama se consideró una concentración de 0.01 M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

## *2.7 Voltamperometría de pulso diferencial*

La técnica se usó para determinar la concentración de iones de cobre en el agua cruda y agua tratada. Las mediciones se hicieron con un potenciostato Épsilon en una celda de tres electrodos. El electrodo de referencia fue un electrodo saturado de calomelanos (SCE), electrodo auxiliar de grafito, y un electrodo de pasta de carbono como electrodo de trabajo. La voltamperometría se realizó a un potencial aplicado de -800 a 700 mV con una amplitud de pulso de 50 mV, un paso potencial de 4 mV y un tiempo de modulación de 0.05 s. La concentración de Cu<sup>2+</sup> en las muestras de agua residual se estimaron a partir de mediciones de una solución estándar usando el pico que aparece aproximadamente en -0.116 V (Sonthalia *et al.*, 2004).

## 2.8 Análisis de lodo

La muestra de lodo se colectó después de 60 minutos de tratamiento. Posteriormente se deshidrató a 80° C y se caracterizó mediante un análisis de composición elemental por combustión, Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido (Jeol JSM 6510 LV) y Difracción de Rayos X.

## 3 Resultados y discusión

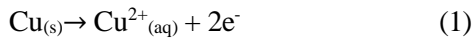
Durante el tratamiento electroquímico del agua residual se tomaron muestras cada 10 minutos hasta que finalizó la experimentación (1 h). Posteriormente, se realizaron los análisis correspondientes para determinar la calidad del agua tratada.

### 3.1. Espectrofotometría UV-Vis

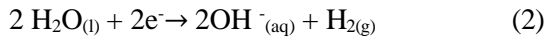
La figura 2, exhibe los espectros UV-Vis del agua residual cruda y del agua residual durante el tratamiento electroquímico. Se observó que el agua cruda presentaba una absorbancia en el intervalo de 200-400 nm, esto puede asociarse a la carga orgánica del agua, puesto que las transiciones electrónicas características de las moléculas

orgánicas se observan en este intervalo (Day y Underwood, 1989; Bazrafshan *et al.*, 2012b; Zhou *et al.*, 2019). La absorbancia de la muestra se vio disminuida por el tratamiento a partir de los 20 minutos (T20), y esta disminución fue sucesiva hasta los 50 minutos. Los resultados obtenidos se atribuyeron a la eliminación de los contaminantes por interacción con hidróxidos de cobre que formaron agregados con las partículas, los que posteriormente se integran como flóculos, y finalmente se eliminan por precipitación (Barrera-Díaz *et al.*, 2015; Garcia-Segura *et al.*, 2017). En la electrocoagulación con cobre, ocurre la disolución de iones  $\text{Cu}^{2+}$  en el ánodo, mientras que en el cátodo se produce  $\text{H}_2$ . Durante el proceso se llevan a cabo las siguientes reacciones (1-5) (Baes y Mesmer, 1986; Holt *et al.*, 2004; Prajapati y Chaudhari, 2015):

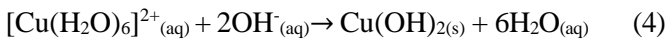
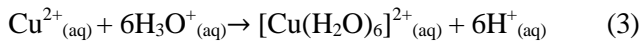
*Reacción anódica*



*Reacción catódica*



*Reacciones en solución*



### Reacción general

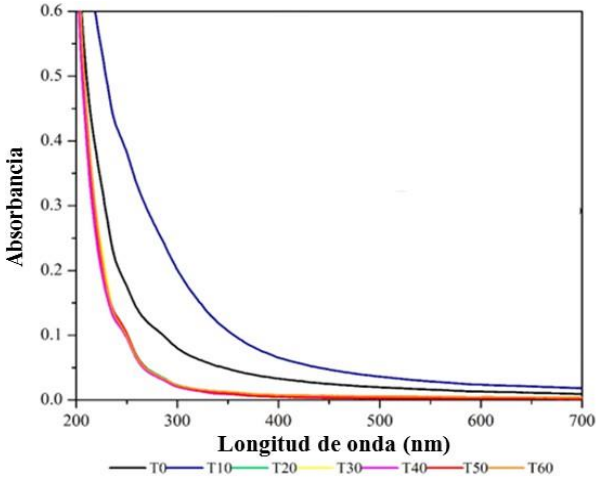


Figura 2. Espectros de absorción UV-Vis del agua residual municipal durante el tratamiento electroquímico

En la figura 3, se presenta el diagrama de distribución de especies de cobre en solución acuosa. Se observa que a un valor de pH inferior a 7 la especie predominante es el catión  $\text{Cu}^{2+}$ , así mismo, se encuentra  $\text{CuSO}_4$ . A un valor de pH 7 se forma  $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_{4(\text{cr})}$ , y esta especie predomina hasta  $\text{pH} = 8.1$ . La especie  $\text{Cu}(\text{OH})_{2(\text{cr})}$  puede verse a valores de pH entre 7.8-12.6, mientras que a valores muy básicos de pH ( $\text{pH} > 10$ ) se presenta  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$  y  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ .

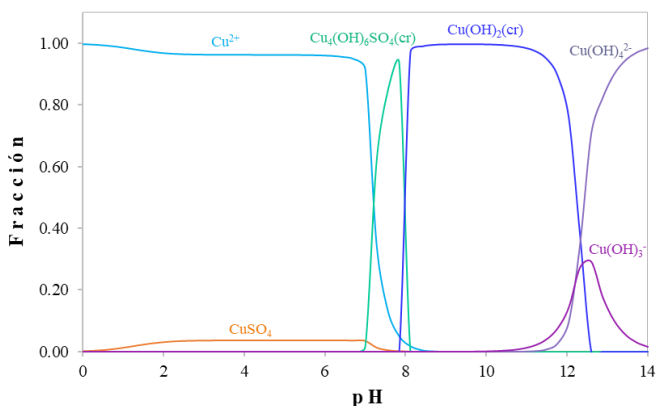


Figura 3. Diagrama de distribución de especies de Cu (II) en solución acuosa con 0.01 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

En la figura 4 se presenta la absorbancia de las muestras a 254 nm (UV<sub>254</sub>) durante la electrocoagulación. Puedo verse que a los 10 minutos de reacción, la absorbancia del agua incrementó, esto se produjo por la presencia de iones Cu<sup>2+</sup> que aún no formaban las especies Cu<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>SO<sub>4</sub> y/o Cu(OH)<sub>2</sub>, y por lo tanto se encontraban disueltos en el agua residual. Transcurridos 20 minutos, el agua exhibió una reducción de la absorbancia UV<sub>254</sub> del 45%, y al final del tratamiento la absorbancia descendió 48%. La disminución de la absorbancia a 254 nm se ha relacionado con la eliminación del contenido de contaminantes orgánicos (Edzwald *et al.*, 1985; Weishaar *et al.*, 2003).

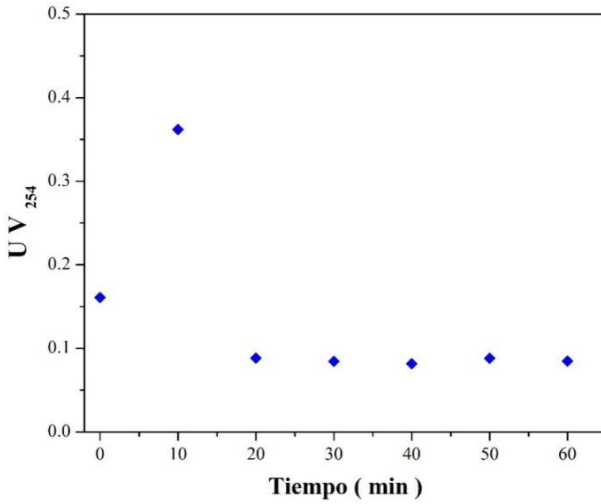


Figura 4. Absorbancia a 254 nm vs. tiempo de tratamiento electroquímico del agua residual.

Se ha descrito que el análisis de la absorbancia específica a 254 nm ( $SUVA_{254}$ ) puede indicar el carácter aromático de los contaminantes orgánicos del agua residual, puesto que los enlaces conjugados presentan absorbancia a esta longitud de onda (Edzwald *et al.*, 1985; Weishaar *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2012 ). El análisis  $SUVA_{254}$  que se obtuvo del agua tratada se muestra en la tabla 1. En comparación con el agua cruda, en el agua tratada la  $SUVA_{254}$  se redujo 47% al final del tratamiento. Se ha reportado que la absorbancia a 254 nm se atribuye a la absorción de compuestos orgánicos que contienen enlaces C=C o C=O o grupos funcionales aromáticos (Wang *et al.*, 2012). Los resultados observados sugieren que una proporción considerable de los contaminantes orgánicos del agua

residual municipal son compuestos aromáticos, y que estos se reducen después de 20 minutos de electrocoagulación.

Tabla 1. Propiedades ópticas del agua residual antes y después del tratamiento electroquímico.

Muestra	UV <sub>254</sub>	SUVA <sub>254</sub>
Agua residual cruda	0.161	1.605
Agua residual tratada	0.085	1.323

### 3.2. Color y turbidez

Los resultados de color y turbidez se muestran en la figura 5. Al evaluar la turbidez, se observó que en el agua tratada se alcanzó una eficiencia de remoción del 50 % después de 40 minutos. El color del agua se redujo a partir de 20 minutos de tratamiento, y la mayor reducción se obtuvo a los 40 minutos. Después de 50 minutos, se observó el aumento de coloración de la muestra. Esto pudo deberse a la formación de complejos de cobre con una fracción de la materia orgánica, lo cual causó que iones  $\text{Cu}^{2+}$  permanecieran en el agua, limitando su precipitación. Se ha reportado que la materia orgánica puede formar complejos con iones metálicos, debido a que presenta grupos funcionales orgánicos con sitios muy activos (por ejemplo, amida, carboxilo, fenol e hidroxilo) (Prajapati *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2019). En este sentido, Zhou y



colaboradores (2019), estudiaron los efectos de iones de cobre en la remoción de nutrientes en agua residual. Se observó que el cobre se unía a los constituyentes de la materia orgánica disuelta a través de varios mecanismos como resultado de los diversos grupos funcionales. También se determinó que la formación de complejos ocurría en el siguiente orden: C-H (sustancias de tipo húmico), N=O ( $\text{NO}_3^-$ ), Ar-H (tirosina), N-H (tirosina),  $\text{COO}^-$  (tirosina), C-O-C (celulosa), C-O (polisacáridos). Por lo que se concluyó que los grupos funcionales C-H, N=O y Ar-H causarían la unión más rápida con  $\text{Cu}^{2+}$ .

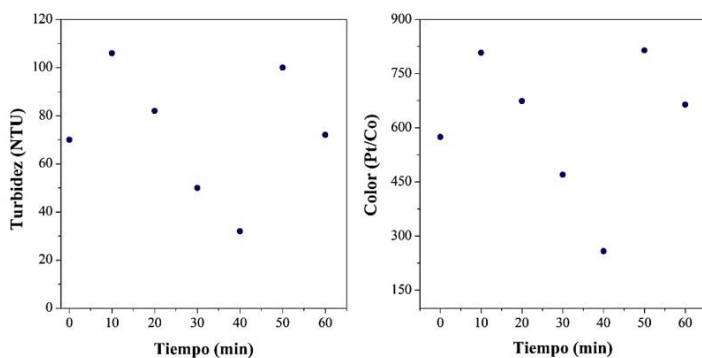


Figura 5. Color y turbidez del agua residual en función del tiempo de tratamiento

### 3.3. pH

La variación del pH durante la reacción puede verse en la figura 6. El valor inicial de pH del agua cruda

fue de 7.1, y se incrementó hasta llegar a 8.4 unidades al final de la electrocoagulación. Este cambio se produjo por la reacción catódica (reacción 2) donde ocurre la reducción del agua que genera iones OH<sup>-</sup>. El valor inicial de la solución es determinante de las especies químicas que se van a formar. De acuerdo con el diagrama de distribución de especies de Cu (II) (figura 3), valores de pH por encima de 7, favorecen la formación de Cu<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>SO<sub>4</sub>. La presencia de esta especie en el agua residual inició la formación de agregados que atraparon las partículas en solución. Con valores más básicos de la solución (pH>7.8) se genera Cu(OH)<sub>2</sub> (Barrera-Díaz *et al.*, 2015; Prajapati *et al.*, 2016). Este hidróxido (Cu(OH)<sub>2</sub>) produjo flóculos de mayor densidad y tamaño, además con valores de pH mayores a 8, se observó una formación más acelerada de los flóculos. Prajapati *et al.* (2016), reportan que la tasa de sedimentación de flóculos de hidróxidos de cobre aumenta en relación con el incremento del valor de pH, siendo los valores mayores a 8 donde observó la sedimentación más rápida.

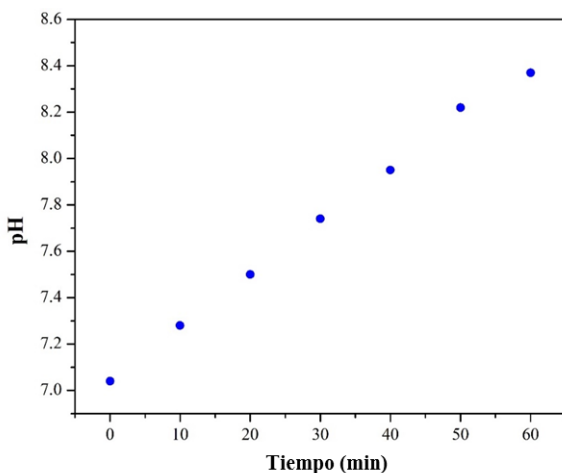


Figura 6. Determinación de pH en agua residual municipal durante el tratamiento electroquímico

### 3.4. DQO

En la figura 7 pueden verse los valores de DQO en función del tiempo. Los resultados mostraron que la concentración de DQO descendió desde los 10 minutos. La mayor remoción se determinó a los 40 minutos de reacción, con una disminución de carga orgánica del 45%. Sin embargo, al final se observó un aumento en la Demanda Química de Oxígeno. Estos resultados son similares a los observados en la medición de color y turbidez. En un tratamiento de electrocoagulación la eliminación de materia orgánica ocurre principalmente por captación y/o

adsorción a hidróxidos de cobre, los cuales son removidos por sedimentación (García-Segura *et al.*, 2017). El incremento de DQO después de 50 minutos de reacción pudo ocurrir por la pasivación del cátodo, ya que la formación de una capa de óxido en los electrodos es un efecto que puede presentarse durante la electrocoagulación. De acuerdo a los resultados observados, la pasivación del cátodo pudo iniciar después de 50 minutos de reacción, causando el descenso de la producción de hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) y la consecuente reducción en la formación de hidróxidos metálicos. La baja producción de hidróxidos derivó en la presencia de  $\text{Cu (II)}$  en solución, lo que resultó en una interferencia para el análisis de DQO. Debido a que se aplicó una técnica que utiliza  $\text{H}_2\text{O}_2$  como oxidante, el cobre pudo catalizar la degradación de peróxido de hidrógeno (Barrera-Díaz *et al.*, 2015; Pérez-Benito, 2001).

Los resultados encontrados en este trabajo respecto a la reducción de DQO coinciden con la investigación realizada por Prajapati *et al.* (2016), donde se usaron electrodos de cobre para el tratamiento de efluentes de la destilería de granos de arroz. Los investigadores reportaron la eliminación de DQO en 39% a un pH de 6.5, mientras que a pH 8 la eliminación fue de 42%. En otros trabajos donde se empleó cobre para el tratamiento de aguas

residuales, se acoplaron más procesos para alcanzar mayor remoción de contaminantes. Petre *et al.* (2015), aplicaron ozonización continua catalizada por cobre, y obtuvieron una reducción del Carbono Orgánico Total (COT) del 75% en una solución de ácido fórmico, acético, oxálico y maleico. Sin embargo, la eficiencia del tratamiento disminuyó considerablemente cuando trataron aguas residuales, donde el COT disminuyó alrededor de 29%. Barrera-Díaz *et al.* (2015) utilizaron un sistema integrado de electrocoagulación con cobre, seguido de la producción de peróxido de hidrógeno para tratar aguas residuales industriales. La eliminación de DQO fue del 78%.

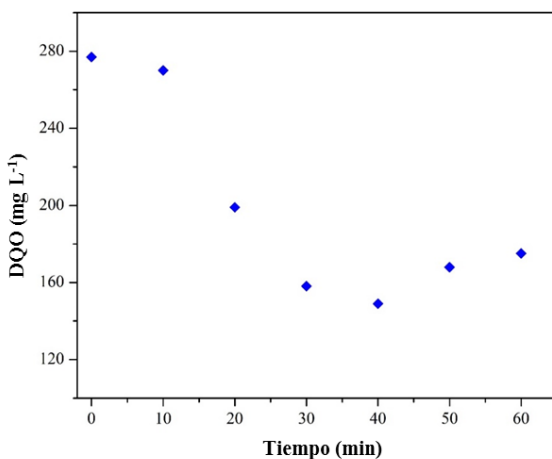


Figura 7. Disminución de DQO en función del tiempo de tratamiento

### *3.5. Cuantificación de cobre*

La cuantificación de cobre en el agua tratada se hizo para determinar la concentración de metal en solución después de la sedimentación. En la figura 8a se muestran los voltamperogramas que se usaron para determinar la concentración de  $\text{Cu}^{2+}$  en una muestra de agua residual a partir de la técnica de adición de estándar. La figura 8b presenta la concentración de cobre en función del tiempo de EC. El análisis mostró que la concentración varía durante toda la reacción. A los 40 minutos (periodo donde se observó la mayor eficiencia de remoción de color, turbidez y DQO), el cobre cuantificado fue de  $7.4 \times 10^{-6}$  mg/mL. En México la concentración máxima permitida es de 4 mg/L (NOM-001-Ecol-1996). Esto indica que la electrocoagulación con cobre puede ser usada para tratar aguas residuales, puesto que la concentración del metal no causará contaminación secundaria.

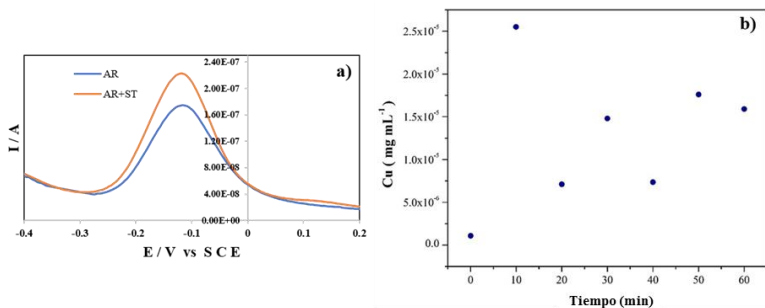


Figura 8. Concentración de cobre en agua residual municipal como función del tiempo de reacción durante la electrocoagulación. a) Voltamperograma del agua tratada durante 20 min de EC. AR: agua residual; AR+ST: agua residual con la solución estándar de  $\text{Cu}^{2+}$ . b) Concentración de cobre en el agua residual

### 3.6. Caracterización de lodo

Con el propósito de determinar las características del lodo que fue generado por EC, se hicieron análisis por SEM, EDS, DRX y Análisis de Composición Elemental por Combustión. El análisis EDS (figura 9a) indica la presencia de carbono, nitrógeno, azufre y cobre. En la figura 9b, se presenta la imagen del lodo estudiado. El cobre se encuentra entre los elementos con mayor porcentaje, esto ocurre por el proceso de EC, que libera  $\text{Cu}^{2+}$ . El origen del nitrógeno, azufre y carbono se debe a los contaminantes orgánicos del agua residual. La figura 10 muestra el patrón de difracción de rayos-X del lodo, en esta se observó que el cobre se encontraba como tenorita ( $\text{CuO}$ ) y como hidróxido de cobre hidratado ( $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). El pico asignado al

hidróxido fue el de mayor intensidad, esto concuerda con el diagrama de distribución de especies de cobre (figura 2), donde puede verse que a valores de pH mayores a 6, se forma la especie  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . En cuanto al  $\text{CuO}$ , su formación se puede relacionar con la desecación del lodo que generó la deshidratación de hidróxidos de cobre.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de la composición elemental (N, C, H, S) de los lodos generados por electrocoagulación. El análisis definió que el nitrógeno, carbono, hidrógeno y azufre constituyen el 10.43% de la composición de los lodos. Debido a las características del lodo, este residuo puede tener una aplicación como enmienda de suelos con aporte de nutrientes, o como un fungicida para control de enfermedades en las plantas. No obstante, es necesario hacer una caracterización química completa y ensayos biológicos para determinar la toxicidad antes de proponer el uso de los lodos (Theodoratos *et al.*, 2000; Morozesk *et al.*, 2016; Placek *et al.*, 2016). Así mismo, la deshidratación completa del lodo puede producir  $\text{CuO}$ , el cual puede ser usado en varias aplicaciones.



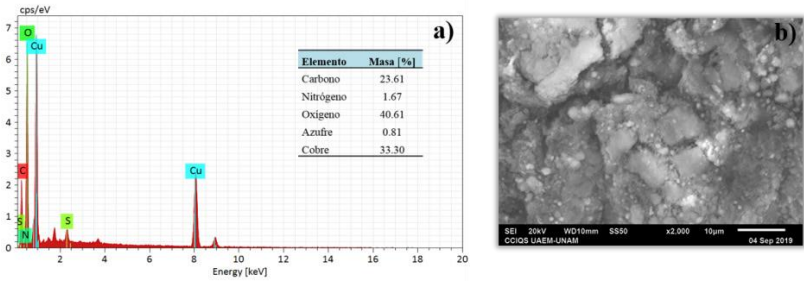


Figura 9. Análisis de la composición de los lodos generados por electrocoagulación. a) Espectro EDS del lodo; b) micrografía MEB

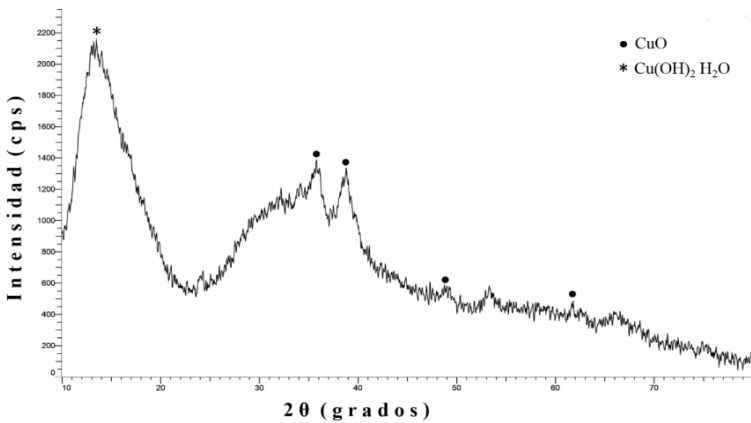


Figura 10. Patrón de difracción de rayos-X de los lodos generados por electrocoagulación.

Tabla 2. Análisis de la composición elemental de lodos derivados del tratamiento electroquímico de aguas residuales municipales.

Elemento	[%]
Nitrógeno	0.55
Carbono	6.61
Hidrógeno	2.05
Azufre	1.22

#### **4. Conclusiones**

Las aguas residuales municipales usadas durante la experimentación, presentaron un pH entre 7.2-7.6 antes del tratamiento electroquímico. El pH del agua residual favoreció la formación de especies  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , las cuales generaron los flóculos que ayudaron a la remoción de los contaminantes y acortaron el tiempo de sedimentación. La generación electroquímica de cobre (II) redujo la concentración de contaminantes orgánicos en el efluente. La Demanda Química de Oxígeno disminuyó 45%, el color y turbidez se eliminaron en 56% y 50%, respectivamente. El valor de pH del agua tratada se encuentra en el intervalo permisible de la norma de descarga de aguas residuales. Aunque no se obtuvo una remoción total de los contaminantes, el tratamiento pudo mejorar los parámetros de calidad del agua, tales como DQO, color y turbidez. En este sentido, la EC puede aplicarse como un tratamiento de sedimentación avanzada para lograr una eficiencia mayor en la eliminación de contaminantes en comparación con los tratamientos convencionales.

## Referencias

- Ali, I., Asim, M., & Khan, T. A. Arsenite removal from water by electro-coagulation on zinc–zinc and copper–copper electrodes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 10 (2), 377-384.
- Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R., & Alkasrawi, M. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260, 749-756.
- Baes, C., and R. E. Mesmer. *The Hydrolysis of Cations*; Robert E. Krieger; Malabar, FL, 1986.
- Barrera-Díaz, C., Frontana-Uribe, B., & Bilyeu, B. Removal of organic pollutants in industrial wastewater with an integrated system of copper electrocoagulation and electrogenerated H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Chemosphere*, 2014, 105, 160-164.
- Barrera-Díaz, C. E., Frontana-Uribe, B. A., Roa-Morales, G., & Bilyeu, B. W. Reduction of pollutants and disinfection of industrial wastewater by an integrated system of copper electrocoagulation and electrochemically generated hydrogen peroxide. *Journal of*

- Environmental Science and Health*, Part A, 2015, 50(4), 406-413.
- Bazrafshan, E., Biglari, H., & Mahvi, A. H. Humic acid removal from aqueous environments by electrocoagulation process using iron electrodes. *Journal of Chemistry*, 2012, 9(4), 2453-2461.
- Bazrafshan, E., Ownagh, K. A., & Mahvi, A. H. Application of electrocoagulation process using iron and aluminum electrodes for fluoride removal from aqueous environment. *Journal of Chemistry*, 2012, 9(4), 2297-2308.
- Ben-Sasson, M., Zodrow, K. R., Genggeng, Q., Kang, Y., Giannelis, E. P., & Elimelech, M. Surface functionalization of thin-film composite membranes with copper nanoparticles for antimicrobial surface properties. *Environmental Science & Technology*, 2013, 48(1), 384-393.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. Standard methods for the examination of water and wastewater; American Public Health Association, Washington, DC, 1998, 4-415.
- Carbajal-Palacios, P., Balderas-Hernández, P., Ibanez, J. G., & Roa-Morales, G. Replacing dichromate with hydrogen peroxide in the chemical oxygen demand (COD) test. *Water Science and Technology*, 2012, 66(5), 1069-1073.

- Day, R. A., & Underwood, A. L. *Química analítica cuantitativa*; Prentice-Hall Hispanoamericana, 1989.
- Edzwald, J. K., Becker, W. C., & Wattier, K. L. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors. *Journal-American Water Works Association*, 1985, 77(4), 122-132.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 801, 267-299.
- Gould, S. W., Fielder, M. D., Kelly, A. F., Morgan, M., Kenny, J., & Naughton, D. P. The antimicrobial properties of copper surfaces against a range of important nosocomial pathogens. *Annals of Microbiology*, 2009, 59 (1), 151-156.
- Grass, G., Rensing, C., & Solioz, M. Metallic copper as an antimicrobial surface. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2011, 77 (5), 1541-1547.
- Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. Deciphering the science behind electrocoagulation remove suspended clay particles from water. *Water Science and Technology*, 2004, 50 (12), 177-184.

- Hossain, M., Mahmud, M., Parvez, M., & Cho, H. M. Impact of current density, operating time and pH of textile wastewater treatment by electrocoagulation process. *Environmental Engineering Research*, 2013, 18 (3), 157-161.
- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3), 381-389.
- Martinez-Huitle, C. A., & Ferro, S. Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chemical Society Reviews*, 2006, 35(12), 1324-1340.
- Mittal, A. Biological wastewater treatment. *Water Today*, 2011, 1, 32-44.
- Morozeck, M., Bonomo, M. M., Rocha, L. D., Duarte, I. D., Zanezi, E. R. L., Jesus, H. C., ... & Matsumoto, S. T. Landfill leachate sludge use as soil additive prior and after electrocoagulation treatment: A cytological assessment using CHO-k1 cells. *Chemosphere*, 2016, 158, 66-71.
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of environmental management*, 2017, 186, 24-41.

- NOM-001-Ecol-1996. Diario Oficial de la Federación; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México, DF, 1997; 1–20.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México, DF, 1996; 7–34.
- Ochoa-Herrera, V., León, G., Banihani, Q., Field, J. A., & Sierra-Alvarez, R. Toxicity of copper (II) ions to microorganisms in biological wastewater treatment systems. *Science of the total environment*, 2011, 412, 380-385.
- Perez-Benito, J. F. Copper (II)-catalyzed decomposition of hydrogen peroxide: catalyst activation by halide ions. *Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly*, 2001, 132(12), 1477-1492.
- Petre, A. L., Carbajo, J. B., Rosal, R., García-Calvo, E., Letón, P., & Perdigón-Melón, J. A. Influence of water matrix on copper-catalysed continuous ozonation and related ecotoxicity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 163, 233-240.
- Pi, Y., Ernst, M., & Schrotter, J. C. Effect of phosphate buffer upon CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cu (II) catalyzed ozonation of oxalic acid solution. *Ozone Science & Engineering*, 2003, 25(5), 393-397.
- Placek, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. Improving the phytoremediation of heavy metals

- contaminated soil by use of sewage sludge. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(6), 605-618.
- Prajapati, A. K., & Chaudhari, P. K. Physicochemical treatment of distillery wastewater—a review. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(8), 1098-1117.
- Prajapati, A. K., Chaudhari, P. K., Pal, D., Chandrakar, A., & Choudhary, R. Electrocoagulation treatment of rice grain based distillery effluent using copper electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, 11, 1-7.
- Puigdomenech, I. Hydrochemical Equilibrium Constants Database (MEDUSA), Royal Institute of Technology, Stockholm, 1997; 10–18.
- Ramalho, R. S. *Tratamiento de aguas residuales*; Reverté, 1996.
- Ren, G., Hu, D., Cheng, E. W., Vargas-Reus, M. A., Reip, P., & Allaker, R. P. Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2009, 33(6), 587-590.
- Sillanpää, M., & Shestakova, M. *Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications*; Butterworth-Heinemann, 2017.
- Sonthalia, P., McGaw, E., Show, Y., & Swain, G. M. Metal ion analysis in contaminated water



- samples using anodic stripping voltammetry and a nanocrystalline diamond thin-film electrode. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 522(1), 35–44.
- Symonds, E. M., Cook, M. M., McQuaig, S. M., Ulrich, R. M., Schenck, R. O., Lukasik, J. O., ... & Breitbart, M. Reduction of nutrients, microbes, and personal care products in domestic wastewater by a benchtop electrocoagulation unit. *Scientific Reports*, 2015, 5, 9380.
- Theodoratos, P., Moirou, A., Xenidis, A., & Paspaliaris, I. The use of municipal sewage sludge for the stabilization of soil contaminated by mining activities. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 77(1-3), 177-191.
- Wang, Y., Wang, Q., Gao, B. Y., Yue, Q., & Zhao, Y. The disinfection by-products precursors removal efficiency and the subsequent effects on chlorine decay for humic acid synthetic water treated by coagulation process and coagulation–ultrafiltration process. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 193, 59-67.
- Weishaar, J. L., Aiken, G. R., Bergamaschi, B. A., Fram, M. S., Fujii, R., & Mopper, K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20), 4702-4708.

Zhang, T., Li, W., & Croué, J. P. A non-acid-assisted and non-hydroxyl-radical-related catalytic ozonation with ceria supported copper oxide in efficient oxalate degradation in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2012, *121*, 88-94.

Zhou, Q., Li, X., Lin, Y., Yang, C., Tang, W., Wu, S., Li, D., Lou, W. Effects of copper ions on removal of nutrients from swine wastewater and on release of dissolved organic matter in duckweed systems. *Water Research*, 2019, *158*, 171-181.

# FITORREMEDIACIÓN



***SALIX BABYLONICA***  
**PARA APLICACIONES EN**  
**FITORREMEDIACIÓN: ANÁLISIS**  
**DE CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS**  
**EN POBLACIONES DEL VALLE**  
**DE TOLUCA**

Griselda Cruz Ruiz<sup>1</sup>, Moisés Tejocote Pérez<sup>2</sup>,  
Patricia Balderas Hernández<sup>1</sup>  
y Gabriela Roa Morales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable  
UAEMéx-UNAM.gzzy2737@hotmail.com,  
pathh2003@yahoo.com.mx

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas,  
UAEMéx.moytej@yahoo.com.mx

<sup>3</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de  
México (UAEMéx).gabyroam@gmail.com

## **1. Introducción**

El acceso a agua potable es fundamental para el desarrollo socioeconómico, el bienestar ambiental y supervivencia de las comunidades humanas, porque de ella dependen las actividades productivas y la salud de éstas. Sin embargo, el aumento demográfico ha incrementado el consumo y

demanda de agua y con ello generado una reducción de los recursos hídricos, así como la contaminación de estos (Amprako, 2016). En México, los indicadores generales muestran que 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados. Una de las principales fuentes de contaminación es la descarga de aguas residuales sin tratar en ríos, lagos y océanos, generando la degradación de sistemas acuáticos (Bunge, 2010).

Esta problemática ha llevado a la comunidad científica a desarrollar tecnologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales (Dhir, 2013). La fitorremediación o uso de especies vegetales para el tratamiento de aguas residuales ha surgido como una alternativa amigable con el ambiente y de bajo costo (Ali *et al.*, 2003). Actualmente la investigación en este campo está orientada a hacer más eficientes los procesos de fitorremediación. Una forma de lograrlo es utilizando especies vegetales con una alta capacidad de acumulación y resistencia a los contaminantes.

Los árboles y arbustos pertenecientes al género *Salix*, conocidos comúnmente como sauces, son especies tolerantes a la presencia de contaminantes, por lo que han sido utilizadas en prácticas de fitorremediación (Kuzovkina y Volk, 2009; Mleczek *et al.*, 2010). Esta tolerancia está relacionada con características fisiológicas y metabólicas propias del

género como un periodo prolongado de crecimiento, alta producción de biomasa, sistema radicular profundo y alta densidad de raíces. Dichas características favorecen la evapotranspiración y con ello la remoción de contaminantes del suelo y agua. Entre los contaminantes tratados con alguna especie de sauce se encuentran compuestos orgánicos, sólidos suspendidos, patógenos, nutrientes y metales (Corseuil y Moreno, 2001; Li *et al.*, 2015; Ramasamy, 2016; Shi *et al.*, 2012; Truu *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017).

Sin embargo, la capacidad de remoción de contaminantes está determinada por diversos factores. Uno de ellos es la concentración del contaminante; por ejemplo, altas concentraciones de contaminante en el medio disminuyen la eficiencia de remoción (Fischerová *et al.*, 2006; Kubatová *et al.*, 2016). Las condiciones del medio también influyen; por ejemplo, en suelos inundados disminuye la biodisponibilidad de los metales pesados debido a la presencia de sulfuros y materia orgánica (Cao *et al.*, 2017).

Otras características como el sexo del individuo, la especie de sauce y el origen del clon también influyen en la eficiencia de remoción. Liao *et al.*, (2019) encontró que bajo condiciones de sequía el efecto negativo sobre la biomasa y el contenido de clorofila era menor en individuos femeninos de

*Salix paraplesia* en comparación con individuos masculinos (Liao *et al.*, 2019). Por otro lado, la especie de *Salix* también tiene efecto sobre la eficiencia de remoción; Mleczek (2017) analizó la eficiencia de remoción de Zn, Pb, y Cu de 145 especies de *Salix* encontrando que solo *Salix acutifolia* fue capaz de remover efectivamente los tres metales.

El origen del clon también tiene un efecto importante en la remoción de contaminantes. Algunos clones provenientes de zonas naturales tienen un mejor desempeño en presencia de diferentes concentraciones de Zn en comparación con clones comerciales (Bernardini *et al.*, 2016).

*Salix babylonica* es una especie dioica que se distribuye en el valle de Toluca (MEXU, 2019) y ha sido utilizada para la fitorremediación de diversos contaminantes (Ghasemi y Mokhtari, 2013; Li *et al.*, 2015; Yu y Gu, 2007, 2008). Por ejemplo, Sánchez-Sánchez (2012), evaluó plantas de *Salix babylonica* en la remoción de contaminantes presentes en efluentes industriales bajo condiciones de laboratorio, obteniendo eficiencias de disminución de 38%, 77% y 65% en cuanto a color, turbidez y DQO respectivamente. Así mismo, reporta el incremento de área foliar proporcional al incremento de agua residual.

En este estudio se caracterizaron ejemplares de *Salix babylonica* presentes en humedales del valle de Toluca, mediante características físicas (altura, tamaño de la copa, ancho del tronco) y así como parámetros metabólicos como concentración de pigmentos fotosintéticos y como la tasa de asimilación neta (TAN) para poder determinar el estado de salud de los ejemplares. Así como parámetros de calidad de agua de los humedales para conocer las condiciones en que se desarrolla *Salix babylonica* que permita elegir fenotipos aptos para prácticas de fitorremediación.

Entre los indicadores utilizados para la selección de clones más resistentes y productivos se encuentran: indicadores de crecimiento como altura, diámetro del fuste e indicadores de adaptación como concentración de clorofila, área foliar y tasa de asimilación neta (Corcuera *et al.*, 2005).

## **2. Materiales y Métodos**

### *2.1 Sitio de estudio*

Se hizo un muestreo dirigido en el valle de Toluca para ubicar humedales donde hubiera presencia de *Salix babylonica* (Sb). Se ubicaron seis localidades del valle de Toluca, Estado de México: Santa Juana 1 (SJ1) 19°22'54'' N, 99°44'03'' O, Santa Juana 2



(SJ2) 19°22'42'' N, 99°44'24'' O, Mexicaltzingo (MEX) 19°13'12'' N, 99°35'22'' O, San Lucas Tunco (SLT) 19°13'34'' N, 99°32'03'' O, Almoloya (ALM) 19°21'53'' N, 99°45'19'' O y San Pedro Tultepec (SPT) 19°15'46'' N, 99°31'03'' O.

## *2.2 Características fenotípicas*

En cada sitio se midieron las características fenotípicas de ejemplares de Sb. También se tomaron muestras de follaje para poder determinar características metabólicas. La toma de muestras se realizó durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre del 2018. Para conocer la calidad del agua de los humedales se tomaron muestras durante la época de lluvias (octubre) y durante la época de estiaje (abril) para determinar parámetros de contaminación. Las características físicas que se midieron fueron: altura, diámetro a altura del pecho DAP.

### *2.2.1 Sexo de los individuos*

Durante el muestreo se identificó el sexo de los individuos mediante la observación de la estructura de sus flores. Las flores se encuentran agrupadas en amentos: los individuos masculinos presentan flores pistiladas en amentos de entre 1.5 -2 cm de largo y de color amarillento mientras que los individuos los

femeninos presentan amentos de 2 a 3 cm de largo y de color verdoso (Orwa *et al.*, 2009).

### 2.2.2. *Altura total*

Se realizó utilizando un clinómetro digital Haglof el cual mide el ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) desde la base el árbol. El cálculo de la altura ( $h$ ) se realizó mediante la ecuación (1):

$$h = X (\text{Tan } \alpha) + P \quad (1)$$

Donde:

$h$  = altura total

$\text{Tan } \alpha$  = tangente del ángulo

$P$  = altura de la persona que realiza la medición

$X$  = Distancia entre la persona y la base del árbol

### 2.2.3 *Diámetro del tronco a altura del pecho (DAP)*

El diámetro del tronco del árbol se midió a una altura de 1.3 m de la superficie del suelo (DAP=diámetro a la altura del pecho) utilizando una cinta diamétrica.

### 2.2.4 *Cobertura*

El diámetro de copa de cada árbol se determinó utilizando una cinta métrica. Partiendo de la base del

tronco como punto central hacia la punta de la copa en dirección a los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, Este, Oeste), obteniendo así un diámetro mayor y un diámetro menor los cuales se promediaron para la obtención del diámetro de copa final de cada individuo.

### *2.3 Caracterización metabólica*

Se tomaron muestras de follaje de árboles adultos de *Salix babylonica*. Dichas muestras se tomaron de la parte media de la copa expuesta a la luz solar. Las muestras se analizaron a nivel laboratorio.

#### *2.3.1 Determinación de pigmentos fotosintéticos*

Las muestras de tejido vegetal se colocaron en acetona 100% durante 24 h a 4°C en condiciones de oscuridad. Después de este tiempo se midió la absorbancia con un espectrofotómetro UV-VisHACH DR 5000 a 470, 645 y 662 nm que corresponden a las longitudes de luz de la clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) y carotenos (Cx+c). Como blanco se utilizó acetona al 100%. Las muestras se analizaron por triplicado. Mediante las ecuaciones propuestas por Lichtentaler (1987) se obtuvo la concentración de las clorofilas y carotenos, así como clorofila total (Chl a+b),

relación  $\text{Chl } a+b/\text{Cx}+c$ , relación  $\text{Chl } a/\text{Chl } b$  (Lichtenthaler, 1987).

### 2.3.2. Tasa de asimilación neta (TAN)

Se tomaron muestras de 500 g de follaje tomado del estrato medio de la copa del árbol. Las hojas fueron colocadas en bolsas de papel en una estufa a 50 °C durante 48 h. Posteriormente se pesaron para obtener el peso seco (PS). El área foliar (AF) se determinó de acuerdo con lo propuesto por Rincón (2012) utilizando el software libre ImageJ para análisis de imágenes (Rincón *et al.*, 2012). Una vez obtenido el peso seco y el área foliar se calculó la tasa de asimilación neta (TAN) mediante la ecuación (2) (Villar *et al.*, 2004):

$$\text{TAN} = (\text{PS}_2 - \text{PS}_1) (\text{Ln AF}_2 - \text{Ln AF}_1) / (\text{AF}_2 - \text{AF}_1) (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Donde:

$\text{Ln}$  = logaritmo natural.

$\text{PS}$  = peso seco de las muestras en  $t_1$  y  $t_2$ .

$\text{AF}$  = área foliar en el periodo

$t_1$  y  $t_2$ =tiempo

### 2.4 Parámetros de calidad del agua

Se obtuvieron muestras de 500 mL cada cuerpo de agua, las cuales se mantuvieron en laboratorio a 4 °C

para su caracterización (físicoquímica). Para la caracterización de las muestras se consideró: alcalinidad  $\text{CaCO}_3$ , nitrógeno amoniacal, fósforo, nitratos, para lo cual se utilizó un Fotómetro Multiparamétrico HI 83200. La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó con base a las técnicas y fórmulas descritas en la norma NMX-AA-030-SCFI-2001.

Los valores de referencia y las Normas de los parámetros DQO, alcalinidad  $\text{CaCO}_3$ , nitrógeno amoniacal, fósforo y nitratos, que se utilizaron para determinar el estado de los cuerpos de agua son los indicados en la Tabla 1 y 2 (CONAGUA, 2015).

Tabla 1. Categorías la clasificación de cuerpos de agua de acuerdo con los valores de DQO

Categoría	DQO (mg/L)
Excelente	$\leq 10$
Buena calidad	$>10$ y $\leq 20$
Aceptable	$>20$ y $\leq 40$
Contaminada	$>40$ y $\leq 200$
Fuertemente contaminada	$>200$

Tabla 2. Normas mexicanas que indican los límites máximos permisibles para los parámetros evaluados

Norma	Establece	Parámetro	Límite permisible
NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Alcalinidad	300 mg/L
		$\text{CaCO}_3$	0.5mg/L
		Nitrógeno amoniacal	10 mg/L
		Nitratos	

Norma	Establece	Parámetro	Límite permisible
NOM-001-Semarnat-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Fósforo	5-10 mg/L

### 3. Resultados y Discusión

Durante la realización del estudio se llevaron a cabo cuatro muestreos para cada sitio, excepto para la localidad de Almoloya, en la cual para el mes de diciembre los árboles ya no contaban con hojas. Se pudo realizar la caracterización fenotípica y metabólica de 68 ejemplares de *Salix babylonica* para cada uno de los sitios.

#### 3.1 Caracterización fenotípica

##### 3.1.1 Sexo

Al realizar el análisis de las flores de todos los individuos de *Salix babylonica* se determinó que todos los individuos pertenecían al sexo femenino. Al no identificar individuos masculinos no existe reproducción sexual de la planta. Aunque de manera natural existen poblaciones femeninas (Shafroth *et al.*, 1994) y es reconocida la alta capacidad de reproducción vegetativa de los sauces (Budde *et al.*, 2011) es altamente probable que la propagación de

*Salix babylonica* sea resultado principalmente de la intervención humana con este resultado tiene fuertes implicaciones para el manejo de *Salix*, ya que la reproducción vegetativa en una población genera una baja diversidad genética que se traduce en una alta susceptibilidad de los individuos a enfermedades. Existen reportes de incidencia del hongo *Melampsoraepitea* en el 90% de una población de *Salix babylonica* (Reséndiz *et al.*, 2018). Por lo cual sería necesario establecer programas de manejo que garanticen la diversidad genética.

### 3.1.2 DAP, altura y cobertura

La prueba de ANOVA mostro que existen diferencias significativas entre localidades para las variables DAP ( $F=19.33$ ,  $p<0.05$ ,  $n=68$ ), altura h ( $F=4.38$ ,  $p<0.05$ ,  $n=68$ ) y cobertura ( $F=13.97$ ,  $p<0.05$ ,  $n=68$ ). Los valores promedio para cada variable se muestran en la Tabla 3. La localidad de SLT fue la que mostró los valores más altos para las tres variables; la localidad de SPT mostró los valores más bajos para h y DAP. La localidad de SJ2 mostró el valor más bajo para cobertura.

Tabla 3. Valores promedio de las variables fenotípicas para cada localidad

LOCALIDAD	n	DAP (cm)	h (m)	Cobertura (m <sup>2</sup> )
Santa Juana 1	12	60.60	11.38	7.55
Santa Juana 2	11	46.85	10.56	7.52
San Pedro	15	45.57	10.10	10.90
Almoloya	10	61.93	13.93	10.44
San Lucas	10	83.20	13.99	11.73
Mexicaltzingo	10	83.07	13.41	11.30

### 3.2 Características metabólicas

#### 3.2.1 Concentración de pigmentos

La prueba de ANOVA multifactorial muestra que los factores de localidad y muestreo tienen un efecto sobre los valores de los parámetros Chl a, Chl b, Cx+c, Chl a+b, Chl a+b / Cx+c y Chl a/ Chl b (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de varianza para Chl a, Chl b, Cx+c, Chl a+b, Chl a+b / Cx+c y Chl a/ Chl b por localidad y muestreo

Parámetro	Factor	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Chl a	Localidad	5	0.58	23.12	0.0000
	muestreo	3	0.39	15.87	0.0000
Chl b	Localidad	5	0.049	9.3	0.0000
	muestreo	3	0.013	2.88	0.0367
Cx+c	Localidad	5	1.51	13.48	0.0000
	muestreo	3	1.45	12.99	0.0000
Chla+b	Localidad	5	0.89	19.83	0.0000



	muestreo	3	0.62	13.87	0.000
Chla+b/Cx+c	Localidad	5	11.32	23.79	0.0000
	muestreo	3	3.70	7.79	0.0001
Chl a/ Chl b	Localidad	5	20.05	7.72	0.0000
	muestreo	4	26.81	10.32	0.0000

La concentración de pigmentos es un indicador de salud de las plantas. Valores por debajo de 4.2 de la relación clorofila total/carotenos estarían indicando daños al aparato fotosintético, estrés o senescencia (Brix, 1987). En este estudio se encontró que entre los cuatro muestreos para la relación Chla+b/Cx+c existen diferencias significativas con valores promedio menores a 3 (Tabla 5). Los valores son similares entre los periodos de marzo, junio y diciembre mientras que los valores más bajos se presentan en el mes de septiembre (Figura 1).

Tabla 5. Valores promedio de la relación Chl a+b/Cx+c (g/mL pf) por localidad y por muestreo

Localidad		Muestreo	
ALM	2.50	mar	2.318
MEX	2.71	jun	2.508
SJ2	2.28	sep	1.963
SLT	2.19	dic	2.542
SPT	1.56		
SJ1	2.86		

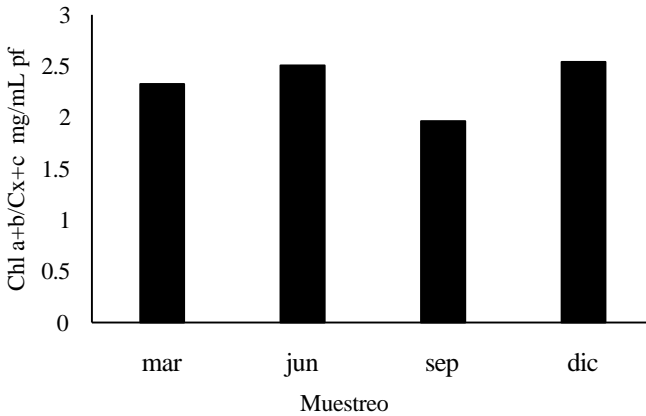


Figura 1. Relación Chl a+b/Cx+c por muestreo, pf=peso fresco

Una prueba de Kruskal-Wallis mostró que entre localidades existen diferencias significativas para los valores de la relación clorofila total/carotenos (Chl a+b/Cx+c) ( $H=126.011$ ,  $p=0$ ) (Figura 2). Se encontraron diferencias en los valores promedio entre las localidades para la relación a/b ( $H=35.3018$ ,  $p<0.05$ ) (Figura 3).

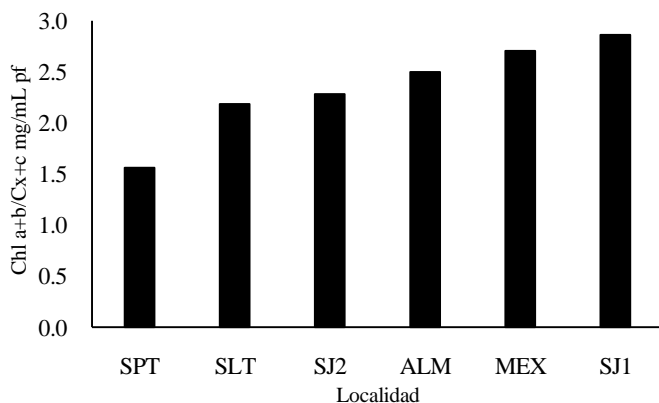


Figura 2. Relación Chl a+b/Cx+c por localidad, pf=peso fresco

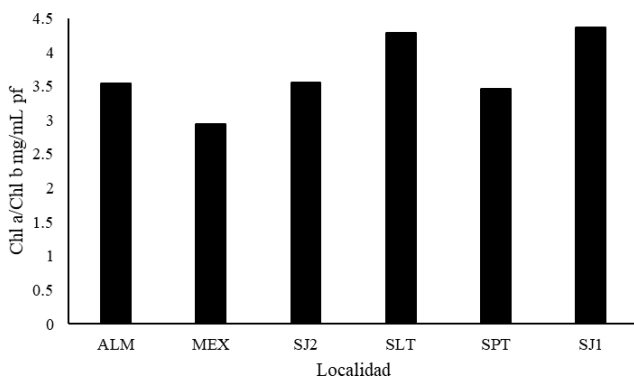


Figura 3. Relación clorofila a/clorofila b por localidad, pf=peso fresco

La concentración de pigmentos fotosintéticos es un parámetro utilizado para evaluar el estado fisiológico de las plantas. Su concentración puede variar debido a diversos factores. La intensidad de radiación lumínica y la temperatura afectan la

concentración de pigmentos; en los meses de alta temperatura o a mayor intensidad disminuye su concentración debido a sus efectos en los centros de reacción (Abbas *et al.*, 2017; Díez *et al.*, 2017). La calidad y cantidad de nutrientes presentes en el ambiente también afecta la concentración de clorofila, siendo mayor su concentración en ambientes ricos en nutrientes (Hepriyadi *et al.*, 2019). Condiciones de estrés como enfermedades, contaminantes o salinidad también afectan la concentración de pigmentos en las plantas. Algunas enfermedades afectan el tejido donde se encuentran los cloroplastos afectando la concentración de pigmentos, siendo menor en plantas enfermas en comparación con plantas resistentes (Jabeen *et al.*, 2017).

### 3.2.2 Tasa de asimilación neta (TAN)

El análisis de TAN muestra que las variaciones entre muestreos no son significativas ( $P > 0.05$ ) (Figura 4). Sin embargo, las variaciones son significativas entre localidades ( $P > 0.05$ ), siendo el valor más alto para la localidad de SJ2 ( $0.0595 \text{ kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y el valor más bajo para la localidad de Almoloya (Figura 5). Sin embargo, la prueba de LSD indica que los valores de TAN de Almoloya son similares a los valores de las localidades de Mexicaltzingo y San

Pedro Tultepec que mantienen su follaje durante todo el periodo de muestreo.

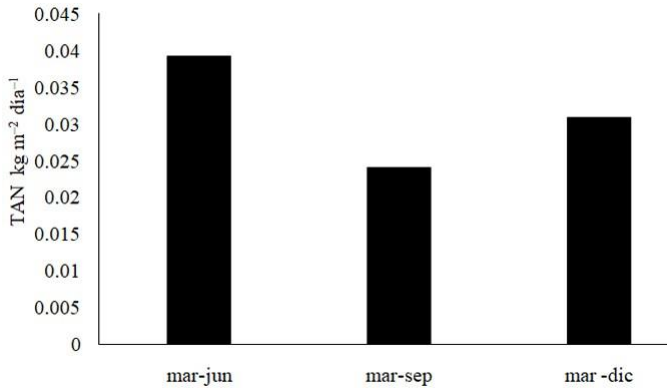


Figura 4. Tasa de asimilación neta (TAN) por muestreo

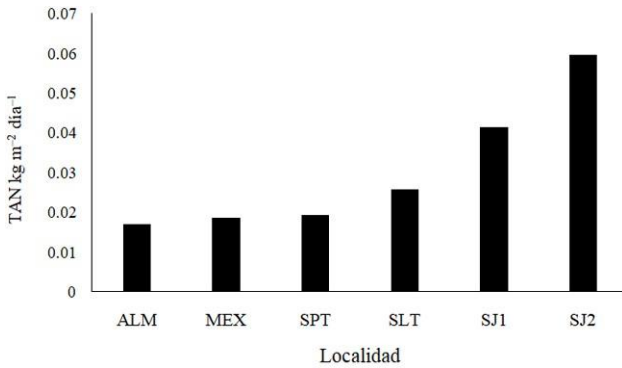


Figura 5. Tasa de asimilación neta (TAN) por localidad

### *3.3 Parámetros del agua*

Se realizó el análisis de los cuerpos de agua de cada localidad. Los valores promedio de los parámetros medidos se muestran en la Tabla 6. Los valores de la época de estiaje son mayores en comparación a los valores presentes en la época de lluvia. La NOM-127-SSA-1994 establece que los límites permisibles de alcalinidad en cuerpos de agua no deben ser mayores a 300 mg/L. De acuerdo con esa referencia las localidades de SLT y SPT presentan valores por encima de los límites permisibles. En cuanto al nitrógeno amoniacal, todas las localidades presentan valores por encima del límite permitido que es de 0.5 mg/L, siendo MEX y SLT las localidades con los valores más altos.

De acuerdo con la clasificación de CONAGUA (2015) de los cuerpos de agua con relación a los valores de DQO, las localidades de AL, MEX y SPT son cuerpos de agua contaminados, mientras que las localidades SJ1, SJ2 y SLT se encuentran dentro de la categoría de fuertemente contaminados.

Los valores de fósforo están por debajo del límite permisible que es de 5-10 mg/L en todas las localidades (NOM-001-ECOL-1996). Mientras que los valores de nitratos se encuentran por encima del límite permitido según la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 6. Valores promedio para los parámetros de calidad del agua medidos para cada localidad

Localidad	Temporada	Parámetro				
		Alcalinidad CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Nitratos (mg/L)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)
Al	Lluvia	128.33	0.35	0.77	4.43	67.27
	Estiaje	215	5.85	2.47	11.3	96.2
SJ1	Lluvia	101.67	1.27	1.43	1.3	158.6
	Estiaje	110	2.1	3.6	14.77	326.86
S J 2	Lluvia	71.67	0.35	0	1.23	132.6
	Estiaje	146.7	11.26	1.83	16.53	310.2
Mex	Lluvia	173.33	12.1	1.2	5.63	93.3
	Estiaje	272.5	35.95	4.7	30.3	157.53
SLT	Lluvia	275	17.07	3	3.4	173.93
	Estiaje	310	35.83	6.3	43.73	411.53
SPT	Lluvia	250	0.72	1.4	1.3	115.6
	Estiaje	540	2.08	3.95	0.85	193.2

#### 4. Conclusiones

El análisis realizado a las características descritas en este estudio muestra que existen diferencias entre localidades, es decir, los árboles de *Salix babylonica* con mejores características físicas (altura, DAP, cobertura) para prácticas de fitorremediación son los pertenecientes a la localidad de San Lucas Tunco en el municipio de Metepec. Esta localidad también está clasificada como fuertemente contaminada de acuerdo con los parámetros de DQO establecidos

por CONAGUA. Sin embargo, los árboles han sobrevivido bajo estas condiciones hasta alcanzar tallas grandes, lo cual es un reflejo de la tolerancia de la especie a condiciones de estrés. Dichas condiciones de estrés también se ven reflejadas en los bajos valores de  $\text{Chl } a+b/Cx+c$  obtenidos en las seis localidades. Sin embargo, sería preciso realizar bioensayos *in situ* para profundizar su nivel de tolerancia.

En las seis localidades solo se observaron individuos femeninos, lo cual significa que la propagación de *Salix babylonica*, ha sido mediante propagación vegetativa humana y, por lo tanto, se asume que existe una baja diversidad genética en las poblaciones. En este sentido es necesario realizar análisis de DNA para determinar si los individuos son genéticamente diferentes entre las seis localidades o son clones y si las diferencias metabólicas y fenotípicas encontradas entre ellas, son el resultado de las condiciones ambientales en donde se desarrollan.



## Referencias

- Abbas, Z.K., Saggu, S., Rehman, H., Al Thbiani, A., Ansari, A.A. Ecological variations and role of heat shock protein in *Artemisia judaica* L. in response to temperature regimes of Tabuk, Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2017,24,1268–1273.  
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.001>
- Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N., Singh, S.P. Phytoremediation of lead, nickel, and copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of antioxidant enzymes and antioxidant substances. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 2003, 70, 462–469.  
<https://doi.org/10.1007/s00128-003-0009-1>
- Amprako, J. L.. The United Nations World Water Development Report 2015. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 2016, 4(2), 64-65.
- Bernardini, A., Salvatori, E., Di Re, S., Fusaro, L., Nervo, G., Manes, F. Natural and commercial *Salix* clones differ in their ecophysiological response to Zn stress. *Photosynthetica*, 2016, 54, 56–64. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0155-9>
- Brix, H., 1987. Chlorophylls and carotenoids in plant material. *Methods* 3–5.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378630-2.00039-6>
- Budde, K.B., Gallo, L., Marchelli, P., Mosner, E., Liepelt, S., Ziegenhagen, B., Leyer, I. Wide spread invasion without sexual reproduction? A

- case study on European willows in Patagonia, Argentina. *Biological Invasions*, 2011, 13, 45–54. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9785-9>
- Bunge, V. El estado de saneamiento en las cuencas de México. Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización. México: INE, 2010, 92-5
- Cao, Y., Ma, C., Chen, G., Zhang, J., Xing, B. Physiological and biochemical responses of *Salix integra* Thunb. under copper stress as affected by soil flooding. *Environmental Pollution*, 2017, 225,644–653. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.040>
- CONAGUA. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Calidad del agua. Reporte. Escalas de clasificación de la calidad del agua y redes de monitoreo. 2015
- Corcuera, L., Maestro, C., Notivol, E. La ecofisiología como herramienta para la selección de clones más adaptados y productivos en el marco de una selvicultura clonal con chopos. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 2015, 14, 394–407.
- Corseuil, H.X., Moreno, F.N. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline. *Water Resource* 2001. 35, 3013–3017. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00588-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00588-1)
- Dhir, B. Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up. Springer, New Delhi. 2013. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1307-9>
- Díez, M.C., Moreno, F., Gantiva, E. Effects of light

- intensity on the morphology and CAM photosynthesis of *Vanilla planifolia* Andrews. *Revista Facultad Nacional Agronomia*, 2017, 70, 8023–8033.  
<https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61736>
- Fischerová, Z., Tlustoš, P., Jiřina Száková, Kornelie Šichorová. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements. *Environmental Pollution*, 2006, 144, 93–100.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.005>
- Ghasemi, R., Mokhtari, R. Resistance to cyanide by salicylate pretreatment in *Salix babylonica* L. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2013, 25, 275–282.
- Hepriyadi, S.U., Kurniawati, I.D., Prihasty, W., Cordova, H. Analysis of AB nutrient film technique variation towards chlorophyll concentration of lettuce (*Lactuca sativa*) on integrated hydroponic system. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2088, 1–5.  
<https://doi.org/10.1063/1.5095349>
- Jabeen, A., Tv, K., Subrahmanyam, D., Dl, L., Bhagyanarayana, G., Krishnaveni, D. Variations in Chlorophyll and Carotenoid Contents in Tungro Infected Rice Plants. *Journal of Ressearch Develoment*, 2017, 2017, 1–7.  
<https://doi.org/10.4172/2311-3278.1000153>
- Kubatová, P., Hejzman, M., Száková, J., Vondráckova, S., Tlustoš, P. Effects of Sewage Sludge Application on Biomass Production and Concentrations of Cd, Pb and Zn in Shoots of

- Salix* and *Populus* Clones: Improvement of Phytoremediation Efficiency in Contaminated Soils. *Bioenergy Resources*, 2016, 9, 809–819. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9727-1>
- Kuzovkina, Y.A., Volk, T.A. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology. *Ecological Engineering* 2009, 35, 1178–1189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.010>
- Li, H., Zhang, G.C., Xie, H.C., Li, K., Zhang, S.Y. The effects of the phenol concentrations on photosynthetic parameters of *Salix babylonica* L. *Photosynthetica*, 2015, 53, 430–435. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0135-0>
- Liao, J., Song, H., Tang, D., Zhang, S. Sexually differential tolerance to water deficiency of *Salix paraplesia*. A female-biased alpine willow. *Ecology Evolution*, 2019, 9:8450–8464. <https://doi.org/10.1002/ece3.5175>
- Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods Enzymology*, 1987, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- MEXU, H.N. de M. Departamento de Botánica, Plantas vasculares [WWW Document]. Portal datos abiertos UNAM. URL <http://datosabiertos.unam.mx/IBUNAM:MEXU:1161651> (accessed 3.19.19).
- Mleczek, M., Rutkowski, P., Rissmann, I., Kaczmarek, Z., Golinski, P., Szentner, K., Strzyńska, K., Stachowiak, A. Biomass

- productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34, 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.012>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996. Diario oficial de la Federación, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 1997
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano (Modificación). Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, 16 de diciembre de 1999. México
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua – determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2001. México.
- Orwa C, M.A., Kindt, R., Jamnadass, R., Simons, A. *Salix babylonica*, in: Agroforestry Database: A Tree Reference and Selection Guide Version 4.0. 2009, pp. 1–5.
- Ramasamy, E.V. Decontamination of wastewater with phytoremediation. *South Indian Journal of Biological . Sciences*, 2016, 2, 84–87.
- Reséndiz, J.F., Guzmán, L., Muñoz, A.L., Nieto de Pascual, C., Olvera, L.P. Enfermedades foliares del arbolado en el Parque Cultural y Recreativo Tezozómoc, Azcapotzalco, D.F. *Revista*

- Mexicana de Ciencias Forestales*, 2018, 6, 106–123. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i30.211>
- Rincón, N., Olarte, M.A., Pérez, J.C. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revistade la Facultad Nacional de Agronomía, Medellin*, 2012, 65, 6399–6405.
- Sánchez-Sánchez, A., Tejocote-Pérez, M., Fuentes-Rivas, R. M., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V. And Fonseca-Montes De Oca, R. M. G. Treatment of a textile effluent by electrochemical oxidation and coupled system electrooxidation– *Salix babylonica*. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 2018: 1–12.
- Shafroth, P.B., Scott, M.L., Friedman, J.M., Laven, R.D. Establishment, Sex Structure and Breeding System of an Exotic Riparian Willow, *Salix rubens*. *American Midland. Naturalist*, 1994, 132, 159-172 <https://doi.org/10.2307/2426210>
- Shi, X., Leng, H., Hu, Y., Liu, Y., Duan, H., Sun, H., Chen, Y. Removal of 2,4-dichlorophenol in hydroponic solution by four *Salix matsudana* clones. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2012,86,125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.09.002>
- Solarte, M. E., Moreno, L., & Melgarejo, L. M. Fotosíntesis y pigmentos vegetales. In L. . Melgarejo (Ed.), *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia. 2010, pp. 107–122. Bogotá:
- Truu, J., Truu, M., Espenberg, M., Nõlvak, H., Juhanson, J. Phytoremediation And Plant-

- Assisted Bioremediation In Soil And Treatment Wetlands: A Review. *Open Biotechnology Journal*,2015,9,85–92.  
<https://doi.org/10.2174/1874070720150430E009>
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J.L., Poorter, H., Valladares, F., Marañón, T. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas, *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 2004, 191–227.
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., Sun, W., 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 2017, 184, 594–600.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>
- Yu, X.Z., Gu, J.D. Effects of available nitrogen on the uptake and assimilation of ferrocyanide and ferricyanide complexes in weeping willows. *Journal of Hazard. Materials*, 2008, 156, 300–307.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.020>
- Yu, X.Z., Gu, J.D. Metabolic responses of weeping willows to selenate and selenite. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007,. Res. 14, 510–517.  
<https://doi.org/10.1065/espr2007.04.407>

# AGRICULTURA SUSTENTABLE

---







# ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE *PLEUROTUS OSTREATUS* DESDE UN ENFOQUE SUSTENTABLE

María Dolores Medina Miranda<sup>1</sup>, Edith Erielia  
Gutiérrez Segura<sup>1</sup>, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo<sup>2</sup>  
y Miguel Ángel Balderas Plata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). mdmedina@hotmail.com, edithgs77@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). jggc1321@yahoo.com.mx, comedgeo@hisavista.com, mabalderasp@uaemex.mx

## 1. Introducción

El hongo *Pleurotus ostreatus*, también es conocido como hongo seta, gigante, ostra, oreja, o cazahuate; en Asia es llamado shimeji o hiratake y está distribuido ampliamente en todo el mundo, (Aceves *et al.*, 2015). Ha tenido una amplia aceptación tanto en los productores como consumidores, debido a las facilidades con las que puede ser producido, así como los beneficios alimenticios para los consumidores. Para el productor es una gran alternativa utilizar los residuos los cuales no han sido empleados en otra actividad redituable, a su vez

el consumidor cuenta con un producto alimenticio con beneficios nutricionales como se ha identificado.

Las hojas de plátano, aserrín, paja de arroz, paja de avena, paja de maíz, paja de cebada, vaina de poroto, cáscaras de frutos cítricos, cáscara de coco, hojas de canela, pulpa, aserrín de café, mazorca de maíz, cáscara de semilla de algodón, cáscaras de maní, hojas de hierba de limón, hierbas de legumbre, paja de mostaza amarilla, planta de papiro, el follaje de la papa, planta de quinoa, bagazo de caña de azúcar, cáscara y tallos del girasol, incluso residuos como son el periódico y papel (Poppe, 2005) son algunos de los residuos agrícolas que se han investigado, por lo que la diversidad de sustratos utilizados es uno de sus principales atractivos en su producción, en cada región, cada productor tiene a su alcance diferentes elementos y cantidades de ellos.

Tomando en consideración la definición de *Pleurotus ostreatus* se infiere que uno de los problemas ambientales en la producción agrícola de México es el manejo adecuado de los residuos. En la Tabla 1, se puede observar que varios de los cultivos que ahí se mencionan tienen como característica la lignocelulosa, la cual es el principal componente de la pared celular de las plantas, representa cerca del 40% de la biomasa vegetal producida por la fotosíntesis. Estos materiales están compuestos

básicamente de tres tipos de polímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina), que representan una organización estructural compleja constituyendo un factor limitante para su biodegradación (Rodríguez *et al.*, 2018).

Tabla 1. Principales Cultivos en México

Cultivo	Superficie (miles de hectáreas)			Producción obtenida (miles de toneladas)	Rendimiento (t/ha)
	Sembrada	Cosechada	Porcentaje de avance		
Total	3 273.4	1 745.8	53.3	8 584.8	NA
Granos	3 053.5	1 603.7	52.5	6 613.6	NA
Maíz	1 224.0	640.1	52.3	3 004.9	4.7
Frijol	220.2	188.8	85.8	185.0	1.0
Trigo	747.1	579.9	77.6	2 765.1	4.8
Arroz	12.9	2.1	16.2	10.6	5.1
Sorgo	849.2	192.7	22.7	648.0	3.4
Oleaginosas	153.1	86.4	56.4	54.2	NA
Soya	3.2	0.4	13.4	1.0	2.3
Ajonjolí	13.9	10.0	72.3	5.3	0.5
Cártamo	136.0	75.9	55.8	47.9	NC
Otros cultivos	66.8	55.7	83.4	1 917.0	NA
Jitomate	23.8	20.7	87.1	965.7	46.7
Chile verde	34.8	29.9	85.8	741.2	24.8
Fresa	8.2	5.1	62.0	210.1	

Fuente: SAGARPA, 2015

Nota: Cifras preliminares a mayo de 2015. La suma de las cifras parciales puede no coincidir con los totales debido al redondeo. t/ha Toneladas por hectárea. NA No aplicable. NC No calculable.

Porcentaje de avance se refiere al porcentaje de la relación entre lo cosechado y sembrado

La cantidad anual de esquilmos oscila alrededor de 45 millones de toneladas de materia seca para los diez principales cultivos (maíz, sorgo, trigo, frijol, arroz, cebada, soya, algodón, cártamo y ajonjolí); el rastrojo y olote de maíz (25,500,000 toneladas), las pajas de sorgo (6'600,000 toneladas) y de trigo (4,500,000 toneladas) representan poco más del 81% de los residuos de cultivos (SAGARPA, 2015).

En el Estado de México, el volumen de producción de este hongo fue de 1, 328.10 toneladas, los principales municipios donde se produce son Ixtlahuaca, Jiquipilco y Atlacomulco (Gobierno del Estado de México, 2014).

El punto clave para la elección de residuos a usar como sustrato, es seleccionar los cuales estén al alcance, es decir, aquellos producidos en la región, con el objetivo de darles un valor agregado. Los principales residuos que se utilizan son agrícolas y se han hecho pruebas adicionando algún suplemento orgánico o inorgánico el cual sirva para subsanar alguna de las deficiencias que tengan, algunos de ellos son heno de alfalfa, harina de trigo, harina de plumas, urea, sulfato de amonio, extracto de levadura, salvado de soya, salvado de trigo, salvado de arroz, cal, caliza molida, entre otros (Pineda-Insuasti *et al.*, 2014).

Cada productor dependiendo su propio ritmo de crecimiento, según su mercado y necesidades puede

producir el hongo. Los requerimientos de producción se adaptan al modo artesanal, donde los recursos son limitados, pero están al alcance de todos, modo semi industrial en el que se utilizan elementos que facilitan la producción y por último el modo industrial en que aumenta la inversión pero se incrementa la cantidad. Los parámetros nutricionales del *Pleurotus* spp: proteína (%) 19.59, carbohidratos (%) 64.34, grasa (%) 1.05, vitamina D (IU/g) 487, sodio (mg/kg) 208.87, potasio (%) 2.70, K:Na 129:1, hierro (mg/kg) 183.07, manganeso (mg/kg) 6.47 y zinc (mg/kg) 162.18 (Manikandan *et al.*, 2016). Por estas razones es importante conocer las generalidades de producción de este hongo como una manera de combatir pobreza y enriquecer la alimentación. El exceso de producción puede ser comercializado y generar un extraeconómico para el productor apoyándolo a mejorar su calidad de vida. Este documento pretende mostrar la producción de este hongo con un enfoque sustentable, el cual en ocasiones es olvidado en búsqueda de mayores rendimientos para incrementar el beneficio económico, se revisan de manera integral los elementos y etapas que conforman su producción bajo esta óptica.

Los métodos de producción actuales, en los que se utilizan agroquímicos en forma desmedida; en una sociedad en la cual cada día se consumen

alimentos de apariencia perfecta, en menor tiempo y a bajo costo, se ha optado por obligar a la naturaleza a satisfacer las demandas, aun en su detrimento. En contrapeso de esta situación se considera el enfoque sustentable. La sustentabilidad definida por Calvente (2007) “como la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas”, en ésta además se busca que cumpla con los tres pilares que la componen, como lo son el aspecto social, ambiental y económico. El proceso de producción del hongo seta puede adaptarse a la definición de *Pleurotus ostreatus*.

## **2. Generalidades del hongo *Pleurotus ostreatus***

Este hongo crece en la naturaleza preferentemente sobre residuos de material leñoso o ricos en fibra como troncos, ramas y bagazos. Para su cultivo se pueden utilizar materiales que contengan una composición similar a los que utiliza para crecer en su ambiente natural (López-Rodríguez *et al.*, 2008). Su clasificación Taxonómica se describe en la Tabla 2.

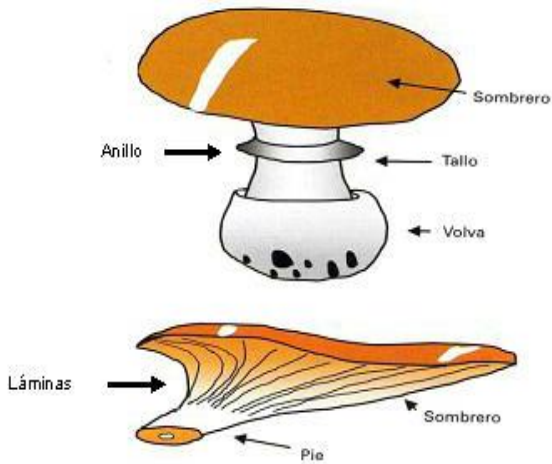
Tabla 2. Clasificación taxonómica del género *Pleurotus*

<b>Reino</b>	<b>Fungi</b>
<b>División</b>	Basidiomycotina
<b>Clase</b>	Homobasidiomicete
<b>Subclase</b>	Hymenomicete
<b>Orden</b>	Agaricales
<b>Familia</b>	Tricholomataceae
<b>Género</b>	<i>Pleurotus</i>
<b>especie</b>	<i>ostreatus</i>

Fuente: Rodríguez, 1996

La morfología del hongo incluye el sombrero o píleo, que protege a las láminas o himenio, este último es la parte fértil del hongo y donde se producen las esporas. El sombrero es sostenido por el pie o estípite, en el cual existen a veces el anillo y la volva (Figura 1). El anillo es el resto de un velo que cubría a las láminas en el estado juvenil del hongo y la volva también es el resto de una envoltura que envolvía toda la fructificación (Guzmán *et al.*, 1993).





Fuente: Instituto de Salud Pública y Laboral de Navarra, n.d.

Figura 1. Partes del hongo *Pleurotus ostreatus*

Los hongos son alimentos saludables debido a su bajo valor energético, bajo contenido en sodio, contenido en manitol y proteínas, alto contenido en vitaminas, entre otros, pueden ser recomendados ampliamente para mantener la salud y como parte de la dieta de personas con sobrepeso, diabéticas, hipertensas o con ciertos problemas metabólicos (Sánchez *et al.*, 2007)

### **3. Proceso de Producción del *Pleurotus ostreatus***

El proceso de producción del hongo se muestra en la Figura 2, se analiza el de modo artesanal, con el objetivo que cualquier persona interesada pueda producirlo contando con los elementos a su alcance, como se ha mencionado previamente es sencillo, pero es necesario contar con una guía apoyando al que inicia o aclare y refuerce al que ya se dedica a este cultivo.

El proceso de producción se describe a continuación:

- a) Compra de insumos: los insumos requeridos son los siguientes:
  - Sustratos seleccionados, los cuales pueden ser paja de maíz, avena, trigo, cebada, etc.
  - Micelio comercial
  - Contenedor de metal
  - Tanque de gas
  - Quemador
  - Bolsas de plástico o contenedor de plástico con orificios
  - Alcohol
  - Navaja

Picadora

Arpillas

- b) Preparación de sustratos: una vez seleccionados los sustratos, deberán ser reducidos para estar homogéneos, se realiza con ayuda de la picadora, quedando de 2 a 4 cm de longitud. Se pesa la cantidad en seco para futuras referencias.
- c) Fermentación del sustrato: Se humecta la mezcla y se acomodan en pilas para su fermentación, cada tercer día se realizan volteos para favorecer la aireación. Se deja una semana, si es necesario se agrega más agua para mantener humedecida la mezcla.
- d) Pasteurización: Se coloca en el quemador el contenedor de metal con agua y se lleva a ebullición. Cuando el agua este hirviendo se introducen las arpillas con el sustrato fermentado (previamente, durante una semana) se dejan dentro durante una hora. La temperatura alcanzada es entre 80 a 100° centígrados.
- e) Siembra del micelio: Transcurrida la hora del paso previo, se coloca en una mesa desinfectada con alcohol, el sustrato a enfriar, cuando este a una temperatura de 22 a 24 °C. Se van haciendo las bolsas con capas de sustrato y micelio, con un peso total de 10 kg peso húmedo. Se cierran,

posteriormente con la navaja desinfectada se hacen cortes a la bolsa a los costados.

- f) Incubación: Se colocan en el área de incubación la cual debe ser un área cerrada, oscura, con una humedad de 60 – 90 %, una temperatura de 18 – 28°C (Flores y Contreras, 2012). Permanecerán ahí hasta cuando el micelio haya invadido el sustrato, lo cual ocurre aproximadamente a las 2 o 3 semanas. Posteriormente empiezan a aparecer los primeros primordios (brotes del hongo), se recomienda pasarlo al área de producción.
- g) Producción: Después de aparecer los primordios se cambia a un lugar con mayor ventilación. Se recomienda cortar las setas, haciendo tres periodos de corte, el tiempo transcurrido entre ellos es aproximadamente de 15 a 20 días.
- h) Cosecha: Las setas aparecerán en racimos se cortan de la bolsa, con un cuchillo teniendo cuidado de no dejar restos en la bolsa. El hongo ya está listo para su comercialización o transformación. Se recomienda se venda en los 2 ó 3 días siguientes de la cosecha, tiende a deshidratarse y su calidad disminuye, ocasionándose con esto pérdidas. Para que su calidad no merme demasiado se recomienda refrigerar el producto (Velasco y Vargas, 2004).

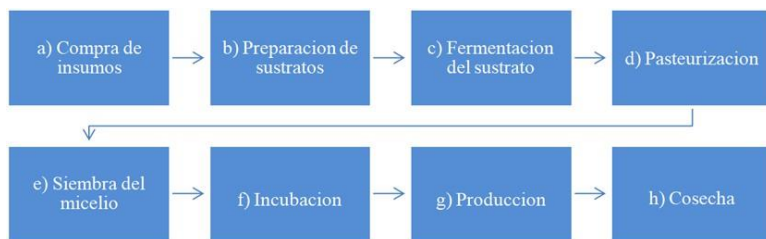


Figura 2. Proceso de producción del *Pleurotus ostreatus*, modo artesanal

#### 4. Consideraciones Teóricas

Algunos conceptos importantes por considerar en los procesos de producción de alimentos son: el papel de las ciencias ambientales, la sustentabilidad con la que se lleva a cabo; y como la agricultura sustentable, la agroecología, agricultura orgánica y contaminación ambiental proporcionan algunas pautas a seguir para lograr el objetivo, teniendo en cuenta los ejes ambiental, económico y social.

Para el cultivo del hongo se analiza todo el proceso desde una postura sustentable, es por ello que se plantea un manejo integral de los insumos empleados, ofrece una alternativa de producción proporcionando un valor agregado como lo es el hongo para consumo propio o incluso puede ser comercializado. Teniendo esto en mente se describen los conceptos y como se interrelacionan para describir el proceso de producción del hongo.

#### *4.1 Ciencias Ambientales, interacción de disciplinas*

Las ciencias ambientales constituyen un área del conocimiento cuyo objeto de estudio es el resultado de esta interacción sociedad-naturaleza, y que se manifiesta tanto en la transformación de los ecosistemas como en la construcción de la institucionalidad social, científica, tecnológica y económica (Saenz, 2007). Una de sus definiciones se ha enunciado como “Las disciplinas híbridas encaminadas a la formulación de respuestas aplicadas a las problemáticas ambientales contemporáneas” (Bocco y Urquijo, 2013) .

La producción del hongo requiere un enfoque interdisciplinario y transdisciplinario para satisfacer esta situación problemática sin afectar el ambiente; lo que es una situación compleja que requiere el conocimiento e intercambio de diferentes disciplinas y/o teorías; como lo son las ciencias ambientales, la sustentabilidad, la agricultura sustentable, la agroecología, la agricultura orgánica y la contaminación ambiental.

#### *4.2 Enfoque sustentable, el desarrollo en equilibrio*

El desarrollo sustentable se puede definir como “Aquel desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer las opciones de las

necesidades futuras” (López, López-Hernández, y Ancona, 2005); es un concepto empático hasta cierto punto, que requiere estar consciente no solo de las necesidades de las actuales generaciones, sino de las que vienen, este pensamiento libre de egoísmo ha sido el objetivo a seguir por mucho tiempo. Como lo mencionan Gutiérrez *et al.*(2012) un sistema es considerado sustentable cuando produce, en un estado de equilibrio dinámico, una combinación específica de bienes y servicios que satisfacen un conjunto de metas (productividad), sin degradar sus recursos base (estabilidad); es capaz de enfrentar (confiabilidad) y recuperarse rápidamente de perturbaciones (resiliencia); y encontrar estados alternativos de equilibrio (adaptabilidad); basándose en la organización de los involucrados (autogestivo); reduciendo la dependencia del exterior (autodependencia) con una adecuada distribución de responsabilidades y beneficios entre sus integrantes (equidad). Bajo esta definición tan detallada de las características de un sistema sustentable, es posible analizar el sistema de producción del hongo, y de esta manera concluir que varias de las peculiaridades previamente mencionadas se practican. Cumple con varios objetivos su producción, por una parte, se obtienen el hongo, el proceso de producción no sufre alteraciones notorias; debido a la adaptación de usar

variados residuos como sustratos se ocupan esquilmos agrícolas para su cultivo, además de existir opciones de producción, desde el modo artesanal o bien a gran escala como el industrial; por lo que está abierto para cambios, es dinámico su proceso. Como se ha visto los residuos utilizados dependen de lo que el productor tenga a su alcance, además los residuos agrícolas que se obtienen del proceso pueden ser reutilizados.

La sustentabilidad también abarca tres ejes rectores que son ambiental, social y económico. El sistema de producción del hongo plasma en todos sus pasos estos tres ejes, el ambiental al usar residuos los cuales si son mal manejados generan contaminación; el eje social otorga a los productores otros cultivos alternos que les permita mejorar la alimentación, asegurándoles un sustento con las características nutrimentales como son: rico en carbohidratos, fibra y minerales y bajo contenido en grasas (Gaitan-Hernandez *et al.*, 2006) asimismo si lo desean pueden comercializarlo obteniendo un ingreso extra que permite aumentar su calidad de vida. En el eje económico se ha analizado la creación de una planta productora de hongo seta bajo condiciones de invernadero, y de acuerdo a los análisis que se han hecho del tema, las principales variables que pueden ayudar a aumentar su rentabilidad son los costos variables, el volumen de



producción, buscar materias primas a menor costo e incrementar su volumen a través de un mejor manejo del cultivo, del mismo modo al darle un valor agregado podría añadir un mayor rendimiento (Romero *et al.*, 2009).

#### *4.3 Agricultura sustentable, aportando alimentos sin perjudicar el entorno*

La producción de alimentos ha sido una constante preocupación en cualquier país, se requieren alimentar a 7 600 millones de personas (Population City., 2019) y cada día aumentando en todo el planeta, con los recursos al límite es necesario tener una agricultura sustentable que ayude a equilibrar las demandas con los recursos que aún se tienen. La agricultura sustentable es aquella forma de producir que a largo plazo mejora la calidad del entorno y la base de recursos de los que depende, aporta alimentos en cantidad suficiente, económicamente viable y mejora la calidad de vida del agricultor. Para la consecución de estos objetivos aboga por una disminución de los aportes externos a la finca fertilizantes, pesticidas, combustibles unidos a la utilización de la lucha integrada en el control de plagas, el laboreo de conservación, rotación de determinados cultivos y el fomento de tecnologías de baja inversión (Labrador y Altieri, 1994).

Por su parte Altieri y Nicholls (2000) menciona algunos objetivos en común que se tienen en todas las definiciones:

- a) Producción estable y eficiente de recursos productivos.
- b) Seguridad y autosuficiencia alimentaria.
- c) Uso de prácticas agroecológicas o tradicionales de manejo.
- d) Preservación de la cultura local y de la pequeña propiedad.
- e) Asistencia de los más pobres a través de un proceso de autogestión.
- f) Un alto nivel de participación de la comunidad en decidir la dirección de su propio desarrollo agrícola.
- g) Conservación y regeneración de los recursos naturales.

El proceso de producción del hongo que se analiza cumple con los objetivos que tiene la agricultura sustentable, si bien no todos, pero la gran mayoría. Ayuda a mejorar la calidad de su entorno al utilizar los residuos agrícolas generados en los cultivos, al llevar a cabo la siembra del hongo en contenedores o en bolsa, ya no se desgasta más al suelo, lo cual permite que se regenere y recupere sus nutrientes. Se obtienen alimentos de un residuo agrícola como lo es el hongo esperado del cultivo. Las personas son capacitadas para aprender a cultivar un alimento que aun en periodos de sequía pueden producir y consumirlo con las ventajas

nutrimentales mencionadas; los productores determinan su propio tamaño de producción, según sus necesidades y recursos; el sustrato agotado del hongo una vez que ha acabado su ciclo productivo puede ser composteado para ser reincorporado al suelo, regenerándolo.

#### *4.4 Agroecología, volver al conocimiento local*

La agroecología une ideas sobre un enfoque de la agricultura más ligado al medio ambiente y más sensible socialmente; centrada no sólo en la producción sino también en la sostenibilidad ecológica del sistema de producción (Hecht, 1999). El paradigma agroecológico provee este enfoque común además permite entender las relaciones entre varias disciplinas y la unidad de estudio: el agro ecosistema con todos sus componentes (Altieri y Nicholls, 2000).

La agroecología ofrece los principios ecológicos que permiten estudiar, diseñar y manejar los agroecosistemas, combinando la producción y la conservación de los recursos naturales; y propone una acción participativa e inclusiva, culturalmente sensible, socialmente justa y económicamente viable (Funes-Monzote, 2009). Altieri (2002) menciona que es una ciencia, definida como la aplicación de los conceptos, principios ecológicos para diseñar

agroecosistemas sustentables, los cuales emergen como una disciplina, son productivos y conservadores de los recursos naturales, de manera que son culturalmente sensibles, social y económicamente viables. También la agroecología por su parte se entiende como el estudio holístico de los agroecosistemas, incluidos todos los elementos ambientales y humanos. Centra su atención sobre la forma, dinámica en función de sus interrelaciones además de los procesos en el cual están envueltas.

Es necesario definir primero que es un agroecosistema, debido a que es la unidad fundamental de estudio en agroecología. Se puntualiza como “el conjunto de relaciones e interacciones que suceden entre suelos, climas, plantas cultivadas, organismos de distintos niveles tróficos, plantas adventicias también grupos humanos en determinados espacios geográficos, cuando son enfocadas desde el punto de vista de sus flujos energéticos, de información, de sus ciclos materiales y de sus relaciones simbólicas, sociales, económicas y políticas, que se expresan en distintas formas tecnológicas de manejo dentro de contextos culturales específicos...” (Leon, 2012).

Bajo esta perspectiva es posible afirmar que el proceso de producción del hongo es el agroecosistema específico que se pretende analizar. Este proceso se ha logrado diseñar para que los

insumos que requiere no sean costosos al utilizar los residuos agrícolas como materia prima principal, además que no son peligrosos para el ambiente al utilizar elementos orgánicos en su preparación. La energía que se utiliza para llevar a cabo el proceso de pasteurización es la requerida únicamente, necesaria ya que de omitir este paso se corre el riesgo de que las bolsas con sustrato se contaminen y requieran más esfuerzos o recursos para contrarrestar esta situación o incluso perder la producción.

#### *4.5 Agricultura Orgánica, el principio de la alimentación sana*

La agricultura orgánica es un método agrícola que tiene como objetivo producir alimentos utilizando sustancias y procesos naturales, tiende a tener un impacto ambiental limitado, fomenta el uso responsable de la energía y los recursos naturales, mantiene la biodiversidad, preservación de los equilibrios ecológicos regionales, mejora la fertilidad del suelo y mantiene la calidad del agua. Además promueven un alto nivel de bienestar animal y requieren que los granjeros satisfagan las necesidades de comportamiento específicas de los animales (Comission, 2019). También se considera que es una estrategia de desarrollo que se funda-

menta no solamente en un mejor manejo del suelo, un fomento al uso de insumos locales, sino también en un mayor valor agregado y una cadena de comercialización más justa (Garcia *et al.*, 2010).

Ha surgido una necesidad de comer sano, que los alimentos estén libres de elementos que no son naturales, para ello surge este tipo de agricultura, que se apoya en gran medida de los conceptos de la agroecología. La agricultura orgánica alimenta al suelo, más que a las plantas, fortaleciendo a los microorganismos y la biota benéfica del suelo, la planta absorbe los nutrientes del suelo, obteniendo una planta nutrida, sana, resistente a plagas también enfermedades (Álvarez Rivero *et al.*, 2005).

En el proceso de producción del hongo, que se está analizando, no se requieren elementos inorgánicos que afecten la salud del consumidor, es decisión del productor si los emplea o no. Si bien no es un alimento que se siembra en el suelo donde hay más factores a cuidar por el uso previo que se le haya dado al suelo, o lo que se le haya aplicado, se debe cuidar todo el proceso para que no sea colocado algún insecticida sintético, si es que llega a aparecer alguna plaga, para lo cual se hace uso de elementos naturales como son trampas de color, y medidas preventivas como el adecuado manejo del sustrato agotado, o condiciones ambientales en la producción.

Los insumos utilizados son los que están al alcance, son producidos por ellos mismos o bien pertenecen a la misma región, ahorrando energía y también recursos al trasladarlos. La mayoría de los productores si son de baja escala de producción, venden el hongo al menudeo, algunos de ellos han formado sociedades para vender sus productos o bien compran a varios productores locales para vender al mayoreo.

#### *4.6 Contaminación ambiental, afectando el bienestar*

El manejo inadecuado de los residuos ha provocado contaminación ambiental, si bien esta siempre ha existido y existirá, el ambiente ha sido rebasado provocando incluso daños en la salud. Se entiende por contaminación la presencia en el aire, agua o suelo de sustancias o formas de energía no deseables en concentraciones tales que puedan afectar al confort, salud y bienestar de las personas, y al uso y disfrute de lo que ha sido contaminado (Encinas, 2011).

Las principales consecuencias de la agricultura comercial que se basa en recursos naturales se pueden apreciar en salinización, acidificación, erosión, compactación, desertificación del suelo; erosión genética, disminución de la diversidad




también el aumento de los monocultivos en detrimento de los policultivos; deforestación, deterioro de los bosques; contaminación además de sedimentación de las aguas; el efecto invernadero así como la ruptura de la capa de ozono; y los efectos en la salud humana.

Las fuentes antropogénicas de contaminación, por la actividad que las origina se clasifican en: industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. En la Tabla 3, se observan los principales residuos agrícolas y el uso que actualmente se les da.

Tabla 3. Principales Residuos Agrícolas

RESIDUOS	MANEJO ACTUAL
 <p data-bbox="493 823 603 930">Excretas y cadáveres de granjas y establos</p>	<p data-bbox="672 767 862 815">Incorporación directa al suelo</p> <p data-bbox="713 823 821 847">Compostaje</p> <p data-bbox="695 855 840 879">Obtención de biocombustibles</p> <p data-bbox="676 906 858 986">Descarga a redes de drenaje municipales y cuerpos de agua</p>
 <p data-bbox="508 1059 588 1107">Residuos vegetales</p>	<p data-bbox="656 1002 878 1026">Reincorporación al suelo</p> <p data-bbox="713 1034 821 1058">Compostaje</p> <p data-bbox="672 1066 862 1090">Alimento para ganado</p> <p data-bbox="656 1098 878 1145">Asimilación con residuos urbanos</p> <p data-bbox="731 1153 803 1177">Quemas</p>
 <p data-bbox="513 1267 583 1291">Envases</p>	<p data-bbox="653 1209 883 1257">Eliminación no controlada (basureros, drenes)</p> <p data-bbox="653 1265 883 1321">Triple lavado y acopio para su posterior reciclaje</p>



	Plásticos	<p>Eliminación no controlada (basureros, terrenos agrícolas)</p> <p>Actualmente hay acciones de manejo en algunos estados (reciclaje y cogeneración)</p>
	Metales	Venta convencional de chatarra
	Residuos químicos difusos y biológico-infecciosos	Es necesario realizar un diagnóstico

Fuente: SAGARPA, 2015

Un ejemplo de contaminación son los esquilmos agrícolas, que son definidos como los subproductos derivados de actividades agrícolas, se les considera como tal a los residuos de hojas y tallos que quedan sobre el terreno después de cosechar el grano o semilla (Borja *et al.*, 2016). La cantidad anual de estos oscila alrededor de 45 millones de toneladas de materia seca para los diez principales cultivos (maíz, sorgo, trigo, frijol, arroz, cebada, soya, algodón, cártamo y ajonjolí); el rastrojo y olote de maíz (25,500,000 toneladas), las pajas de sorgo (6,600,000 toneladas) y de trigo (4,500,000

toneladas) representan poco más del 81% de los residuos de cultivos (SAGARPA, 2015).

Los residuos agrícolas si no son bien manejados constituyen una fuente de contaminación, por lo que es necesario darles un uso, como lo es alimentar al ganado cuando hay sequia o bien el proceso de producción del hongo analizado, donde se aprovecha.

## **5. Conclusiones**

En este documento se presenta el proceso productivo del hongo, el cual se ha abordado de una manera sencilla y clara, que permite a cualquier persona poder elaborarlo, además se han contemplado los conceptos y disciplinas que están interrelacionados con el proceso para una mejor visión sustentable.

La agricultura en general es una de las principales actividades económicas del hombre, pero algunas prácticas se han llevado a cabo afectando al suelo, haciendo que estén presentes condiciones no aptas para producir alimentos. Surge la necesidad de producir alimentos con los recursos dispuestos, entre ellos producción del hongo *Pleurotus ostreatus*, el cual como se ha analizado cumple con muchas características de ideal en varios aspectos, como lo son utilizar residuos agrícolas, incluso los que se tienen al alcance, dándoles un valor agregado y

apoyando la seguridad alimentaria de las personas, al obtener de su producción un alimento nutrimentalmente muy valorado.

El hongo producido es un alimento sano al que es posible agregar suplementos para mayor productividad o para compensar alguna de las características que no tenga el sustrato utilizado. Las condiciones actuales económicas y sociales, favorecen que este cultivo haya sido tan aceptado y difundido, existen diversidad de sustratos para producir, igualmente cada día surgen otros o posibles combinaciones de ellos a seguir investigando y realizando pruebas.

Este tipo de capacitaciones a las personas genera valor agregado al proporcionarles herramientas necesarias para subsistir, se requiere se siga divulgando con apoyo de programas de gobierno para una mejor difusión y alcance, además es necesario apoyar investigaciones con los diferentes residuos que hay en cada región, con el fin de conocer las combinaciones necesarias de los elementos para obtener los mejores rendimientos.

## Referencias

- Aceves, M., Casimiro, A., Flores, A., Sánchez, O., Marco, A., Michel-Aceves, A. C., Barrios-ayala, A. (2015). Productos químicos y biológicos como suplementos que incrementan la producción del hongo ostra *Pleurotus ostreatus*.
- Albert, L. (n.d.). Contaminacion ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos.
- Altieri, M. (2002). Agroecología : principios y estrategias para disenar una agricultura que conserva recursos naturales y asegura la soberania alimentaria. *Universidad de California, Berkeley*. Revisado de:  
[http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/user\\_arquivos\\_64/Agroecologia\\_-\\_principios\\_y\\_estrategias.pdf](http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/user_arquivos_64/Agroecologia_-_principios_y_estrategias.pdf)
- Altieri, M. y Nicholls, C. (2000). Teoría y práctica para una agricultura sustentable. In *Agroecología* (1 a ed.). Programa de las Naciones Unidad para el Medio Ambiente.
- Álvarez Rivero, J. C., Díaz González, J. A. y López Naranjo, J. I. (2005). Agricultura orgánica v.s. agricultura moderna como factores en la salud pública. ¿Sustentabilidad? *Horizonte Sanitario*,4(1),28.  
<https://doi.org/10.19136/hs.v4i1.304>
- Bocco, G. y Urquijo, P. (2013). Geografía

- ambiental : reflexiones teóricas y práctica institucional. *Region y Sociedad*, XXV, 75–101.
- Borja, B. M., Reyes, M. L., Espinosa, G. J. A., y Vélez, I. A. (2016). Structure and operation of the production chain of agricultural wastes as a forage crop. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 39, 451–464.
- Calvente, A. (2007). El concepto moderno de sustentabilidad, 1–7.
- Comission, E. Organics at a glance. Revisado Octubre 28, 2019, de <https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/farming/organic-farming/organics-glance>
- CONACYT. (2010). *Agricultura orgánica*. (J. L. García Hernández, I. Orona Castillo, E. Salazar Sosa, M. Fortis Hernández, y H. I. Trejo Escareño, Eds.), *AD-minister* (1 a). Durango: CONACYT.
- Encinas, M. (2011). *Medio Ambiente y Contaminacion. Principios basicos* (1a ed.).
- Flores, A.y Contreras, M. (2012). *Manual de Cultivo de Hongo Seta (Pleorotus ostreatus)de Forma Artesanal* (Vol. 3).
- Funes-Monzote, F. (2009). *Agricultura con Futuro* (1a ed.). Matanzas, Cuba: Estacion Experimental “Indio Hatuey.” Revisado de:

- <https://bit.ly/2pWA7b1>
- Gaitan-Hernandez, R., Salmones, D., Perez Melo, R. y Mata, G. (2006). Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción.
- Gobierno del Estado de México. (2014). *Vocación Productiva de chilacayote en el Estado de México*.
- Gutiérrez, J., Aguilera, L., González, C. y Juan, J. (2012). Evaluación de la sustentabilidad, posterior a una intervención agroecológica en el Subtrópico del Altiplano Central de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15(2), 15–24.
- Guzman, G., Mata, G., Salmones, D., Soto-Velazco, C. y Guzman-Davalos, L. (1993). *El Cultivo de los Hongos Comestibles*. Mycologia (1a ed.). Instituto Politecnico Nacional. <https://doi.org/10.2307/3760556>
- Hecht, S. (1999). *La evolución del pensamiento agroecológico*. (Nordan-Comunidad, Ed.), *AGROECOLOGIA: Bases científicas para una agricultura sustentable* (Vol. 7). Revisado de: <http://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol22n2.pdf#page=30>
- Instituto de Salud Pública y Laboral de Navarra. (n.d.). Revisado Octubre 27, 2019, de: <https://bit.ly/345zGtD>
- Labrador, J. y Altieri, M. (1994). *Manejo y diseño*

- de sistemas agrícolas sustentables. Hojas Divulgadoras.* Madrid: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.
- Leon, T. (2012). *Agroecología: La ciencia de los agroecosistemas - La perspectiva ambiental.* (I. de E. Ambientales, Ed.). Bogota.
- López-Rodríguez, C., Hernández-Corredor, R., Suarez-Franco, C. y Borrero, M. (2008). Evaluación del crecimiento y producción de *Pleurotus ostreatus* sobre diferentes residuos agroindustriales del departamento de Cundinamarca. (Trabajo de pregrado), (October), 106.
- López, C., López-Hernández, E., & Ancona, I. (2005). Educación Ambiental. *Horizonte Sanitario*, 4(2).
- Manikandan, K., Ahlawat, O. P. y Singh, M. (2016). Proximate composition of different mushroom varieties and effect of UV light exposure on vitamin D content in *Agaricus ...* Proximate composition of different mushroom varieties and effect and *Volvariella volvacea*, (October).
- Pineda-Insuasti, J. A., Ramos-Sánchez, L. B. y Soto-Arroyave, C. P. (2014). Producción de *Pleurotus ostreatus* por fermentación en estado sólido : una revisión.
- Poppe, J. (2005). Sustrato. In *Manual del Cultivador de hongos 1* (pp. 83–93).

- Population City. (2019). Mundo-Poblacion 1800-2100. Revisado de: <http://poblacion.population.city/world/>
- Rodríguez, G., Martínez, D., Buglione, M., Filippi, M. y Agüero, M. (2018). Cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kummer sobre orujo de pera: Evaluación de la productividad y composición química del sustrato biodegradado. *Anales de Biología*, (40), 21–30.
- Rodriguez, R. (1996). Caracterizacion de cepas del hongo comestible *Pleurotus* spp. en medios de cultivo y su evaluacion en sustratos lignocelulosicos forrajeros para la produccion de carpoforos. Universidad Autonoma de NuevoLeon.  
<https://doi.org/10.1787/9789264060135-16-en>
- Romero, O., Barrios, J. M., Macías, A., Simon, A., Ibañez, A. y Juarez, F. (2009). Analisis de rentabilidad de un sistema de produccion de Hongo Seta bajo condiciones de invernadero, en el municipio de Amozoc de Mota en el Estado de Puebla. *Revista Mexicana de Agronegocios.*, 25, 34–44.
- Saenz, O. (2007). Las ciencias ambientales: una nueva área del conocimiento. Red Colombiana de FormacionAmbiental.
- Sánchez, J. E., Royse, D. J. y Leal, H. (2007). Cultivo, Mercadotecnia e inocuidad alimenticia



*Agaricus bisporus*.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, (SAGARPA). (2015). Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnostico nacional, 1–142. Revisado de:[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346978/Manejo\\_de\\_residuos\\_Detallado.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346978/Manejo_de_residuos_Detallado.pdf)
- Soto, M. L. (n.d.). Agricultura e impacto ambiental en Mexico.
- Velasco, J. V. y Vargas, E. (2004). Cultivo Del Hongo Seta: *Pleurotus ostreatus*. Manual de Producción.

# **CARBONO NEGRO EN LOS SUELOS FORESTALES: UNA REVISIÓN**

Isabel Reyes Avilés<sup>1</sup>, Rodolfo Serrato Cuevas<sup>2</sup>,  
Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>2</sup>  
y Andrés González Huerta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).

isabelreyes.aviles@gmail.com.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados en

Fitomejoramiento. Facultad de Ciencias Agrícolas.

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).

rserratoc@uaemex.mx, fgrfca@hotmail.com,

agonzalesh@uaemex.mx

## **1. Introducción**

El C de los bosques del mundo ha sido estimado en 861 Pg, de los cuales 383 Pg se encuentran en el suelo (44%), 363 Pg en la biomasa aérea (42%), 73 Pg en la madera muerta (8%) y 43 Pg en el mantillo (5%) (Pan 2011). Esto sugiere que aproximadamente la mitad del C de los ecosistemas forestales se encuentra en el suelo, este valor varía con el tipo de bioma. Pan *et al.* (2011) estimaron el C del suelo de los bosques tropicales en 32% y el de los bosques templados y boreales, en 60%. A nivel global los bosques templados ocupan  $1 \times 10^7$  km<sup>2</sup>, lo cual

representa 25% del área forestal. El C almacenado de los bosques se estima en 175 Pg en la biomasa aérea; y 262 Pg en el suelo (Sing *et al.*, 2012). Estos inventarios de C indican que tanto la parte aérea (vegetación) como la parte subterránea (suelos) de los ecosistemas juegan un rol fundamental en el ciclo global del C en función de la magnitud del C capturado y almacenado.

Los incendios forestales son el mayor disturbio en muchas partes del mundo (Bowman *et al.*, 2009), y es común que se presente naturalmente o por acción antropogénica, generando la destrucción de la vegetación forestal. El papel del fuego como fuente de gases de efecto invernadero se ha investigado intensamente, en cambio respecto a otro producto de los incendios forestales conocido como el carbono negro CN, se sabe menos sobre su tasa de producción, aun cuando es la fracción de la materia orgánica (MO) más antigua del suelo (Sing *et al.*, 2012). El CN se acumula en el suelo debido a que tiene tiempos de retorno más largos que los residuos de las plantas (Forbes *et al.*, 2006; Kuhlbusch y Crutzen, 1996).

El suelo es sumidero de CO<sub>2</sub> al transferir el C de ciclo rápido (que se intercambia entre la biosfera y la atmósfera) al suelo en formas de C de ciclo mucho más lento.

Para obtener un informe completo del efecto del fuego en el C y en el sistema climático, se deben tener en cuenta tanto las emisiones de C, como el secuestro de CN en el suelo. Existen pocos datos sobre la producción de CN de los incendios de bosques templados (Preston y Schmidt, 2006; Donato *et al.*, 2009).

Durante los incendios forestales, grandes cantidades de C se liberan como dióxido de carbono y solo una pequeña fracción de la biomasa consumida por el fuego se quema parcialmente, produciendo hollín y carbón (CN), la cual es la fracción más recalcitrante del C del suelo (Carter *et al.*, 2018). Estos productos representan del 1al 5% de la biomasa quemada, pero pueden tener un efecto desproporcionado tanto en la atmósfera como en los flujos de las reservas de C terrestre a largo plazo (Cheng *et al.*, 2008).

Por otro lado, la mayoría de los estudios indican el periodo de retorno del CN de 500 a 1,000 años, por lo que puede funcionar a largo plazo como sumidero de C. Su importancia global depende de las tasas de formación y pérdida (Foreid *et al.*, 2015). De acuerdo con esto, es importante conocer las diferentes formas de C que coexisten en el ambiente (aire, agua, suelo, sedimentos, hielo). Algunos investigadores como Schmid y Noack (2000), Masiello (2004), Forbes *et al.* (2006),

Shrestha *et al.* (2010), Bird *et al.* (2015), Santín *et al.* (2016) y Turcios *et al.* (2016), Mastrolonardo *et al.* (2018) y Min *et al.* (2019), mencionan que el CO<sub>2</sub> del aire es la forma más importante del C, porque contribuye al calentamiento global debido a que es pasiva, inerte, estable y resistente (recalcitrante). El CO<sub>2</sub> es la forma más estudiada para realizar proyecciones del cambio climático e inventarios de almacén de C.

Los bosques templados de México han recibido poca atención en las revisiones teóricas y en los modelos globales del ciclo del C y CN en las proyecciones de la mitigación al cambio climático a nivel regional y mundial (Richardson *et al.*, 2007; Gómez-Díaz *et al.*, 2011).

## **2. Origen del Carbono Negro**

El CN se origina a partir de la biomasa. Comprende una gama de materiales carbonosos, desde carbón CN, residuos sólidos de los tejidos vegetales parcialmente quemados, hasta hollín CN altamente grafitizado, sustancias volátiles formadas dentro de las llamas (Schmidt *et al.*, 2001; Gyami *et al.*, 2010). En su inicio, las partículas de CN de hollín o aerosol se forman como agregados esféricos primarios hidrófobos con geometría irregular que proporcionan sitios activos para el depósito de especies químicas

(Zhang *et al.*, 2008; Crouzet y Marlow, 1995). Con la disminución del tamaño de la partícula (específicamente con tamaños menores de 2 mm), aumenta la capacidad de estas partículas para permanecer en el aire en la atmósfera, promoviendo el transporte a larga distancia (Suman *et al.*, 1997; Gyami *et al.*, 2010). Inmediatamente después de los incendios, las partículas de CN emitidas de más de 1  $\mu\text{m}$  pueden no llegar al aire o caer rápidamente a la superficie del suelo más cercana (Clark y Patterson, 1997; Masiello, 2004). La precipitación y escorrentía eventualmente pueden lavar las partículas de CN que quedan en la superficie del suelo a ríos y océanos a menos que la deposición ocurra a más de 1 km de cuerpos de agua significativos (Clark y Patterson, 1997). Las partículas más grandes de CN y los materiales carbonizados no se pueden transportar y permanecen en el suelo. El tiempo y los procesos naturales como la bioturbación pueden mezclar y acumular dichos materiales de CN con el suelo, promoviendo el secuestro de C y mejorando la absorción de nutrientes.

El tamaño de los materiales del CN abarca desde pocos nanómetros para aerosoles atmosféricos (CN hollín) hasta unos pocos centímetros para fragmentos de carbón de materiales vegetales quemados. A pesar de sus fuentes comunes y su

composición química deficiente en hidrógeno aromático, el CN del carbón vegetal, el CN del hollín y otros componentes del continuo de combustión exhiben variaciones físicas y químicas significativas (Masiello, 2004; Hedges *et al.*, 2001; Gyami *et al.*, 2010). En este capítulo el término CN se describe como la combustión incompleta de la biomasa producto de incendios forestales (Figura 1).

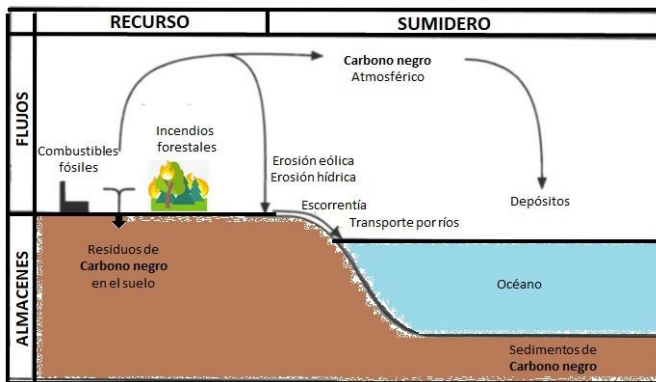


Figura 1. El ciclo biogeoquímico

En la superficie terrestre, el CN es producido por incendios de la vegetación y uso de combustibles fósiles. El CN ocurre ubicuamente en suelos y sedimentos terrestres. Los valores para los flujos se muestran en cursivas en teragramos ( $1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$ ) por año, y el grupo está en petagramos ( $1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$ ). La figura 1 incluye datos de

Kuhlbusch y Crutzen (1996), Schmidt *et al.* (1996, 1999) y Warneck (1998).

### 2.1 Composición química del Carbono Negro

La composición general del CN está dominada por anillos aromáticos condensados y algunos grupos funcionales que lo hacen resistente a la descomposición (Dai *et al.*, 2005; Gyami *et al.*, 2010). La extensión de la polimerización, la estructura macromolecular (grafito versus diamante) y la composición del grupo funcional superficial de CN está influenciada por el tipo del precursor de la combustión (tipo de vegetación), la duración y la temperatura de la combustión en ausencia de oxígeno y la extensión de la etapa posterior a la combustión, envejecimiento por combustión o intemperización (Goldberg, 1985; Gyami *et al.*, 2010). Schmidt y Noack (2000) señalan que la composición química del CN predominantemente contiene lignina, constituyente de las plantas leñosas (ramas y troncos de árboles y arbustos), la cual está compuesta por anillos aromáticos.

Poirier *et al.* (2002) mencionan que el CN se comporta como un material aromático que consiste en pilas orientadas al azar de pocas capas de grafito (Kuhlbusch 1998). Así mismo, contiene importante influencia de alquilo y un contenido



considerable de oxígeno (endocíclico o similar a lactona) (Hernández *et al.*, 2018). Tiene un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos, cumarílico y coniferico, por esta razón es estable y resistente a la oxidación microbiana y abiótica (Kuhlbusch, 1998; Schmint *et al.*, 2005).

Jandl (1997), menciona que el CN es parte del material parental cuando éste se mezcla con los minerales del suelo (cuarzo, feldespatos, micas, fragmentos de roca, arcillas, carbonatos, etc.). A menudo coexisten con el C inorgánico representado por el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Se presenta una fotografía, resultado de una investigación que no ha sido publicada sobre la fracción fina de los suelos de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (Figura 2).

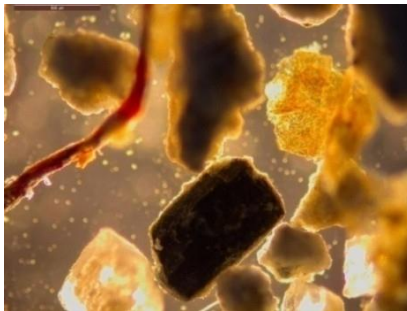
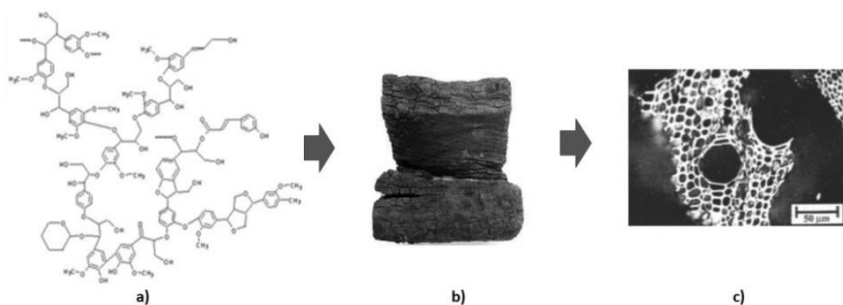


Figura 2. Fracción fina de suelo. Carbono negro con cuarzos y micas encontrado en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Imagen a 500 nm

Por todo lo anterior, se establece que la persistencia del CN en los suelos es muy estable y por consiguiente el proceso de mineralización es lenta (Shrestha y Swanston, 2010), posee una estructura muy porosa con pequeñas cavidades a lo largo de su superficie (Suman *et al.*, 1997, Gyami *et al.*, 2010). Por otra parte, la ceniza es un aglomerado de residuos de sal, contiene poco carbón y no es parte del continuo del CN (Preston y Schmidt, 2006; Keiluweit *et al.*, 2010) (Figura 3). Las características morfológicas y químicas de este material refractario lo describen Schmidt y Noack (2000).

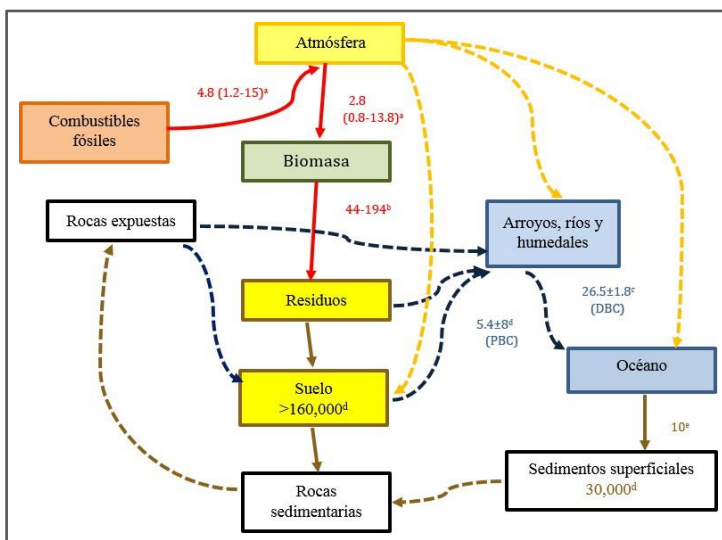


Fuente: a y b) Jin *et al.*, 2014, c) Schmidt *et al.*, 2001

Figura 3. a) Estructura de la lignina, b) carbono negro y c) Estructura porosa, vista por microscopia de luz reflejada

## 2.2 Ciclo global del carbono negro

Si bien el conocimiento actual de los flujos globales y las reservas de carbono negro es limitado, muchos artículos de revisión han propuesto el ciclo global del CN (Masiello, 1998; Schmidt y Noack, 2000; Druffel, 2004; Forbes *et al.*, 2006). Estos se refieren a estudios que han cuantificado varias fuentes y flujos, o han teorizado acerca de fuentes y flujos potenciales que no se han cuantificado. El ciclo global del CN se resume en la Figura 4.



Fuente: a) Bond *et al.*, 2013; b) Kuhlbusch y Crutzen, 1996; c) Jaffe *et al.*, 2013; d) Druffel, 2004; e) Masiello y Druffel, 1998

Figura 4. Representación esquemática del ciclo del carbono negro

Las líneas continuas representan flujos cuantificados, líneas de puntos representan flujos no cuantificados. Los números en cursiva muestran los flujos (TgC/año), en negrita Los números muestran grupos (Tg CN). Los colores de las líneas indican el tipo de flujo: productos de combustión (rojo), Deposición atmosférica (amarillo), hidráulica (azul) y geológica (marrón). Las formas hidráulicas son transportadas como disuelto (DBC por sus siglas en inglés) y particulado (PBC por sus siglas en inglés) de carbono negro.

### *2.3 Importancia del carbono negro en los suelos*

El CN, por ser un depósito pasivo en los suelos se descompone muy lentamente dentro del ciclo del carbono, considerándose como un material recalcitrante con tiempo de vida muy largo en el ambiente, permitiendo que las propiedades físicas y químicas del suelo mejoren, como se menciona a continuación.

#### *2.3.1 Mejoramiento del suelo*

En suelos con altos contenidos de arena y limo, la superficie específica que posee el CN es fuente de cargas negativas que incrementa la capacidad de intercambio catiónico (retención de nutrientes), así

como la retención de agua a capacidad de campo, e incluso puede beneficiarse la actividad microbiana. En suelos con alto contenido de arcillas los macroporos del CN, permiten un mejoramiento del movimiento del agua a través del suelo (infiltración), beneficiando el crecimiento radicular de las plantas. El CN actúa como elemento de unión entre las partículas del suelo. Los polisacáridos constituyen las sustancias más activas en esta función, pero su acción es temporal, ya que son fáciles de degradar por los microorganismos, mientras que las sustancias húmicas, aunque menos efectivas, tiene más duración (Binkley y Fisher, 2013).

### 2.3.2 *pH*

Normalmente el CN puede tener un pH alcalino, siendo efectivo en los suelos forestales ácidos, lo que ocasiona una posible pérdida de elementos nutritivos indispensables para el crecimiento de las plantas.

### 2.3.3 *Adsorción de contaminantes*

Si se llega a contar con sustancias contaminantes en suelo forestal con presencia de CN nuevamente la elevada superficie específica será capaz de adsorber dichos contaminantes, como los metales pesados

mercurio y plomo. Con este fenómeno químico pueden quedar adheridos a la superficie del CN y no sean adsorbidos por las plantas nativas del bosque. Según Wardle *et al.* (2008) durante su estudio de incendios forestales en un bosque boreal, indicaron que las fracciones de CN en el suelo pueden actuar como “punto de acceso” para la actividad microbiana. Por su porosidad tiene capacidad de adsorción para los compuestos alelopáticos y biodegrada compuestos fitotóxicos. A este mismo aspecto se refieren Glaser *et al.* (2001) y Lehmann *et al.* (2003) al decir que el CN retiene nutrientes y juega un papel clave en los procesos biogeoquímicos en los suelos como: reacciones de adsorción de hidrocarburos aromáticos policíclicos, así mismo, intervienen en el ciclo de los nutrientes (Schmidt y Noack, 2000), en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la capacidad de retención de agua (Yli-Halla *et al.*, 2018).

#### *2.3.4 Aumento de microorganismos en el suelo*

El CN tiene un efecto estimulante sobre la respiración microbiana. Carter *et al.* (2018) mencionan que el CN puede incrementar la actividad microbiana en los suelos, aunque el mecanismo exacto aún es incierto.

### 2.3.5 *Cambio climático*

En los suelos forestales la formación y depósito de CN, actúa como un almacén de C (Shrestha *et al.*, 2010). Puede contribuir significativamente a reducir el exceso de carbono de la atmósfera al incorporarlo a la litosfera (suelos) en forma de un compuesto altamente recalcitrante, quedando capturado y almacenado en el suelo por periodos largos de tiempo e incrementa el rendimiento de los suelos forestales. Así mismo, puede provocar un efecto de estabilidad climática.

### 2.3.6. *Biocarbón*

El biocarbón es una forma de CN. Se produce para mejorar el contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas y además sirve como sumidero de carbono para mitigar el cambio climático. Lehmann *et al.* (2005) menciona que, el biocarbón actúa como un mejorador del suelo permitiendo el crecimiento de las plantas, retiene nutrientes y mejora las propiedades físicas y biológicas del suelo. También se usa como filtros para purificar el agua. En la actualidad el biocarbón ha ganado popularidad en la medida en que los científicos han descubierto que además de mejorar la calidad del suelo, también posee una increíble capacidad de captura de

carbono. La estructura física del carbón, creada a través de la quema de materia orgánica en ausencia de oxígeno (pirolisis), la convierte en una propiedad física del suelo muy deseable e importante principalmente para el crecimiento radicular (Downie *et al.*, 2011).

### 2.3.7 *Efectos positivos de los incendios forestales en el suelo*

La mayoría de los bosques de coníferas templados experimentan regímenes de incendios de intensidad moderada a alta cada 50 a 200 años (Binkley y Fisher, 2013). Tomando en cuenta la investigación de Downie *et al.* (2011) menciona que en los suelos australianos de clima templado tienen mayor potencial para secuestrar C, mientras mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo. Sin embargo, el tamaño, la cantidad y tipo de CN almacenado en el suelo depende del tipo, condición de combustible, condiciones climáticas, heterogeneidad del sustrato, intensidad y duración del fuego (Kuhlbusch *et al.*, 1996). Aunque hay poca información acerca de esas relaciones.

El estudio realizado por Kane *et al.* (2010) mencionan que en los bosques boreales de Alaska el fuego es necesario para la sustentabilidad de las funciones del ecosistema y productividad forestal.



En México, los incendios forestales queman en su mayoría (70-90%) pastizales y arbustos. Los primeros se recuperan totalmente en los primeros días de la temporada de lluvias, mientras que los arbustos tardan en hacerlo desde unas semanas hasta un par de años. En el caso de las zonas arboladas (aproximadamente del 10 al 30 % de vegetación que se quema), tardan en recuperarse entre 15 y 50 años, según la especie y otros factores (CONAFOR, 2010).

### *2.3.8 Efecto negativo del fuego en las propiedades físicas y químicas del suelo forestal*

Como ya se mencionó, el CN se origina de la quema de la vegetación forestal, por tal motivo se considera importante analizar la influencia negativa que provoca los incendios en las propiedades físicas y químicas del suelo forestal.

Los suelos que han estado sometidos a una temperatura elevada evidencian siempre cambios en sus propiedades físicas y químicas (Boot *et al.*, 2015). Se conoce que las altas temperaturas que produce el fuego consume materia orgánica del suelo (MOS), por lo tanto, los incendios tienen impactos perjudiciales en las propiedades físicas del suelo, como es el aumento de la densidad aparente, cambio en la textura del suelo debido a la

calcinación de hierro y aluminosilicatos (Neill *et al.*, 2007, Arocena y Opio, 2003), la reducción de la porosidad del suelo y la disminución de la capacidad de almacenamiento del agua (Wells *et al.*, 1979, Scharenbroch *et al.*, 2012).

Los incendios pueden disminuir la cantidad total de nutrientes a través de pérdidas por volatilización, humo, transporte de cenizas, lixiviación y erosión (Arocena y Opio, 2003; Wanthongchai *et al.*, 2008). Se ha encontrado que el pH del suelo aumenta debido a la liberación de iones alcalinos de la producción de potasio (K) y óxidos de Na, hidróxidos y carbonatos en la ceniza (Ulery y Graham, 1993; Xhu *et al.*, 2014) y también la desnaturalización del ácido orgánico por el calentamiento (Scharenbroch *et al.*, 2012).

En la tabla 1, se especifica el efecto de las temperaturas generadas en un incendio y el efecto provocado en el suelo.

Tabla 1. Efecto del fuego en las propiedades físicas y químicas del suelo

Temperatura °C	Efecto en el suelo
50 – 60	Temperatura letal para protoplasma de las plantas
100	Descomposición de algunos componentes del nitrógeno del suelo
100 – 200	Temperatura letal para hongos y bacterias, evaporación del agua
200 – 300	Pérdida del 50%. Empieza a disminuir el valor del pH. Desaparición de algunos componentes de la

	materia orgánica. Aumento de amonio, fósforo, calcio, magnesio y sodio. Incremento de la fracción arena
300	Desaparición por calcinación de la materia orgánica. Formación de una superficie hidrófoba
315	Incremento del pH. Disminución de la capacidad de intercambio catiónico
315 – 400	Pérdida del 45% del nitrógeno
400 – 550	Desaparición del amonio y de los residuos orgánicos
550 – 700	Destrucción total de la materia orgánica. Pérdida de los OH de las arcillas, aumento del pH. Aumento del fósforo y potasio. Descenso brusco de la estabilidad estructural
700 - 900	Oxidación del suelo, cambios irreversibles en las arcillas, descomposición de los carbonatos, incremento del calcio, magnesio, descenso del potasio

Las principales razones del aumento de nutrientes disponibilidad son la generación de cenizas y el aumento de la mineralización. El calentamiento de la Materia Orgánica del Suelo (MOS) suele dar lugar a cenizas con diferentes propiedades, dependiendo de la severidad del fuego, los valores del pH se incrementan, puede originar un aumento de la disponibilidad de nutrientes como son el N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (Rheinheimer *et al.*, 2003; Redin *et al.*, 2011), así mismo, por ejemplo, la disponibilidad de algunos micronutrientes como Fe, Mn o Zn disminuye con el aumento del pH. Sin embargo, los incendios también pueden contribuir a disminuir la disponibilidad de nutrientes a más largo

plazo porque los nutrientes liberados de la materia orgánica y la biomasa microbiana probablemente se eliminarán del ecosistema por lixiviación y escurrimiento (Wüthrich *et al.*, 2002, Miesel *et al.*, 2012).

La recuperación de los nutrientes del suelo después del incendio está limitada en gran medida por la actividad microbiana. Porque los incendios de alta intensidad pueden esterilizar parcialmente la superficie del suelo, la evaluación de la actividad microbiana del suelo después del incendio y observar su dinámica puede realizarse mediante el análisis de las enzimas del suelo. Las enzimas del suelo reflejan la actividad microbiana, importante para el ciclo de C, nitrógeno (N) y fósforo (P) (Boerner *et al.*, 2005, Xhu *et al.*, 2014).

El papel del fuego en el ciclo del C terrestre y la dinámica de los nutrientes se ha investigado ampliamente en los bosques tanto naturales como de plantación en regiones boreales y templadas, así como para tala y quema en la agricultura en los bosques tropicales. Sin embargo, muchas incertidumbres permanecen en los bosques subtropicales.

Como los impactos del fuego en los suelos pueden ser muy variables, lo importante es cómo impacta el fuego sobre el C y los nutrientes del suelo en los bosques, por lo tanto, el conocimiento de

los cambios en la fertilidad del suelo después de los incendios forestales es relativamente escaso debido a la falta de sitios de control adecuados y/o falta de datos previos al incendio. Por lo tanto, los efectos de los incendios forestales en los suelos usualmente se evalúan después del hecho, utilizando bosques cercanos como controles (Bair *et al.*, 1999, Johnson *et al.*, 2007, Xhu *et al.*, 2014). En particular, la quema de la biomasa produce la acumulación de material vegetal carbonizado en el suelo, el cual se convierte en el material de origen de las sustancias húmicas (Carvalho, 2011). Ante esto, Hubau *et al.* (2012) señalan que existen evidencias indirectas de que este material carbonizado podría explicar el origen de ciertos tipos de ácidos húmicos (AH) aromáticos en suelos originados a partir de cenizas volcánicas. Así entonces, si no transcurre el tiempo necesario para que el bosque se recupere de modo natural, se produce una degradación progresiva de los suelos sobre los que se desarrolla.

### *2.3.9 Incorporación, transporte y descomposición de Carbono Negro en el perfil de suelo*

El horizonte O contribuye a la acumulación de MO, a partir de este horizonte el CN se integra al perfil del suelo a través de procesos como bioturbación (actividad de hormigas, termitas, lombrices,

roedores y otros pequeños animales), donde el suelo mineral es depositado por ellos (Mastrolonardo, 2018) o la formación de nuevos horizontes en áreas de acumulación de sedimentos (Binkley y Fisher, 2013). Los procesos dominantes de movimiento de material en los suelos forestales son: lixiviación, eluviación, iluviación, estos procesos existen cuando el abastecimiento de agua en el suelo es abundante (Lukac y Godbold, 2013). Sin embargo, no todo el CN se queda en el perfil del suelo, como lo mencionan Wagner *et al.* (2017) una considerable porción de CN es transferida al sistema acuático en forma de CN disuelto.

Spokas *et al.* (2014) explican que la descomposición del CN, a través del tiempo, se degrada y oxida por procesos bióticos y abióticos, en el caso de la degradación abiótica los factores predominantes son la crioturación o gelifracción.

En lo que respecta al transporte de CN, los suelos afectados por una intensidad alta de fuego reducen su capacidad de infiltración; y por ello, incrementa la escorrentía (Foereid *et al.*, 2015); así, los suelos de estas áreas son más propensos a la erosión hídrica en temporadas de lluvia, provocando la pérdida de CN de los ambientes terrestres (Wagner *et al.* 2017). Una considerable porción de CN es transferida del sistema terrestre al acuático en

la forma de CN disuelto (Stubbins *et al.*, 2015, Wagner *et al.*, 2017).

### 2.3.10 Estimación de la producción de carbono negro en los suelos

La primera estimación global de CN producto de la quema de la biomasa fue realizada por Seiler y Crutzen en 1980 con valores de 500 a 1,700 Tg C/año. En 1996, Kuhlbusch y Crutzen estimaron la producción global de CN en el suelo de diferentes ecosistemas de bosque templado, boreal, pastizales quemados y residuos agrícolas, concluyeron que los residuos de CN de la biomasa quemada fueron de 44 a 194 Tg/año. Así mismo Santín *et al.* (2016) evaluaron que la producción mundial de CN a partir de la quema de biomasa fue de 383 Tg año<sup>-1</sup> y que la mayor parte de CN producido por el fuego se deposita en el suelo.

Por otra parte, Bird *et al.* (2015) mencionan que en las regiones de bosque templado el 42% de CN es almacenado en la superficie del suelo. Las estimaciones más recientes de producción global de CN van de un intervalo de 63 a 140 Tg C/año (Bird *et al.*, 2015) y de 116 a 385 Tg C/año (Santín *et al.* 2016), el cual es equivalente a ~0.1–0.6% de la productividad neta primaria terrestre anual (Huston y Wolverton, 2009).

Por lo tanto, el stock total de CN en los suelos es mayor porque es muy recalcitrante a la descomposición (Schmidt, 2000), lo cual ha conducido a investigaciones sobre el manejo de CN como un medio para secuestrar CO<sub>2</sub> atmosférico en los suelos (Lehmann, 2007).

Existen evidencias de la preservación del CN en los suelos por cientos y miles de años, tal es el caso de los suelos negros en la cuenca del Amazonas llamado Terra Preta (Glaser *et al.* 2001). Kasin *et al.* (2016), mencionan que en el Amazonas grandes cantidades de CN están en esos suelos y fueron abandonados por miles de años. El total de CN almacenado es alto 250 Mg/ha comparado con valores típicos de 100 g/ha m en los suelos de las amazonas derivados de material parental similar (Glaser *et al.*, 2001).

### *2.3.11 Métodos para estimar el Carbono Negro almacenado en los suelos*

Ha sido difícil identificar, aislar y estimar la cantidad de CN almacenado en los suelos, debido a la naturaleza heterogénea de este material como: la variación microclimática en la temperatura de combustión, duración de la quema, tipo de combustible y disponibilidad de oxígeno durante un incendio, además, las metodologías son diferentes,



limitada cobertura espacial, e incertidumbre en la variación de almacén de CN con la profundidad del suelo (Bird *et al.*, 2015). Sin embargo, los métodos analíticos para su determinación cuantitativa son escasos. Para conocer la cantidad CN de una muestra de suelo existen los siguientes métodos. Métodos espectroscópicos (Golberg, 1985): espectroscopia infrarroja (Smith *et al.*, 1975), técnicas microscópicas, oxidación química húmeda y oxidación del CO<sub>2</sub> después de la eliminación de otro material carbonáceo (Kuhlbusch, 1995). Según Glaser *et al.* (1998), algunos de estos métodos han sido desarrollados para la investigación de aerosoles atmosféricos y no pueden ser aplicados a muestras de suelo.

Por otra parte, técnicas de espectroscopia como la resonancia magnética nuclear C<sup>13</sup> (RMN) permite la detección y cuantificación de carbono aromático en CN generado a través de la carbonización (Hammes *et al.*, 2008; Kane *et al.*, 2010).

Wagner *et al.* (2017) cuantificaron el CN usando el método de ácido benceno policarboxílico (BPCA por sus siglas en inglés) ha sido identificado como una aproximación robusta para medir y caracterizar el CN en el ambiente. Del mismo modo Llorente *et al.* (2017) usaron BPCA como marcado molecular. Sin embargo, este método tiene tres desventajas: a) es caro; b) consume mucho tiempo; y

c) parte de la literatura afirma que se debe tener cuidado al aplicar el método BPCA a matrices ricas en materia orgánica. Aunque, ellos usaron un análisis simple directo elemental de contenido de C en el residuo obtenido después de una fuerte digestión en lugar de la determinación molecular por el cromatografía de gases con detector de ionización de flama. Este método simplificado representa una gran reducción del costo y de tiempo dando una rápida respuesta al análisis del suelo.

Weil *et al.* (2003), reportaron un método simple con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) el cual reacciona con las formas de C del suelo (activas) más fáciles de oxidar. El permanganato de potasio tiene muchas características que son propicias para un método de campo, que necesita de pocos reactivos. El color púrpura intenso de la solución  $\text{KMnO}_4$  le permite servir como su propio indicador.

#### 2.4 *Estudio de casos en relación con el carbono negro del suelo*

En un estudio realizado en el macizo granítico de Cadiretas (Girona), sobre un área quemada, se presentaron los siguientes cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo:

- Cambios en la textura del suelo. En las tres zonas de estudio la cantidad de arena disminuye y aumenta la cantidad de limo. El fuego o la alta temperatura producen una micro fragmentación.
- Cambios en el contenido nitrógeno. La concentración del nitrógeno desciende en todas las zonas quemadas después del incendio, debido a que gran parte se volatiliza en forma de  $N_2$  y se transforma en formas más complejas. La temperatura de  $450^\circ C$  es determinante para la pérdida del 75% de nitrógeno.
- Cambios en el contenido de carbono. Hay un aumento de C en las zonas menos intensamente quemadas. Como la cantidad de carbono está directamente relacionada con la cantidad MOS, no se va a observar una disminución drástica del contenido de C hasta que no se rebasen los  $450^\circ C$  que es cuando se produce la combustión de la MO. La MOS sólo aumenta en suelos que han sufrido fuegos de baja intensidad.
- Contenidos de potasio y fósforo asimilables. El potasio presenta un incremento más notable en todas las zonas. Esto se atribuye a la ceniza producida tras la combustión de la

vegetación. Pero si la combustión alcanza los 500 °C hay volatilización de potasio. Sin embargo, a esta temperatura aumenta el fósforo ya que se mineraliza el fósforo orgánico que contiene el suelo.

- Cambios en el pH del suelo. El pH aumentó de valores inferiores 7 a valores de 8. El incremento es mayor cuanto mayor es la intensidad del fuego. Las zonas más intensamente quemadas fueron las que obtuvieron valores más elevados. Después de dos años los valores de pH del suelo disminuyen, pero continúan siendo superiores a los de la zona de bosque control. Estos cambios se deben a la pérdida de grupos hidroxilo por parte de las arcillas y a la formación de óxidos derivados de la disociación de carbono.

Por otro lado, también se debe considerar que el fuego es un factor de perturbación importante en muchos ecosistemas terrestres (Gray y Dighton 2009; Xhu *et al.*, 2014). Las tendencias de calentamiento y las sequías recurrentes aumentan la probabilidad de incendios forestales (Dezzeo y Chacón 2005; Castro *et al.*, 2005; Xhu *et al.*, 2014). El fuego puede llevar a importantes cambios en las propiedades de los suelos

forestales (Neill *et al.*, 2007, Xhu *et al.*, 2014), que soportan procesos críticos tales como la hidrología y los ciclos biogeoquímicos (Neary 1999; Xhu *et al.*, 2014).

## 2.5 *Suelos de Terra Preta, Brasil*

Durante cientos de años, los exploradores han buscado señales en la selva tropical del Amazonas de una antigua civilización conocida como El Dorado, un legendario reino de oro. Un solo explorador español, Francisco de Orellana, atravesó el río Amazonas en 1540 e informó haber visto tramos densamente poblados de complejas sociedades junto a sus riberas, con tierras tan fértiles como las de España. Esto explica la existencia de tal civilización, la que iba en contra de toda lógica, puesto que los suelos amazónicos son bien conocidos como tierras demasiado pobres para la agricultura. En agosto de 2002, varios arqueólogos que habían ido al Amazonas en busca de El Dorado encontraron señales de civilización en la sabana a orillas de la selva pluvial de Llanos de Mojo, en Bolivia (Figura 5). La zona estaba cubierta de unas islas de densa selva, y dentro de estas islas forestales había montículos algunos de hasta 18 metros de altura llenos de implementos domésticos y huesos, lo cual sugería que en estas selvas habían existido

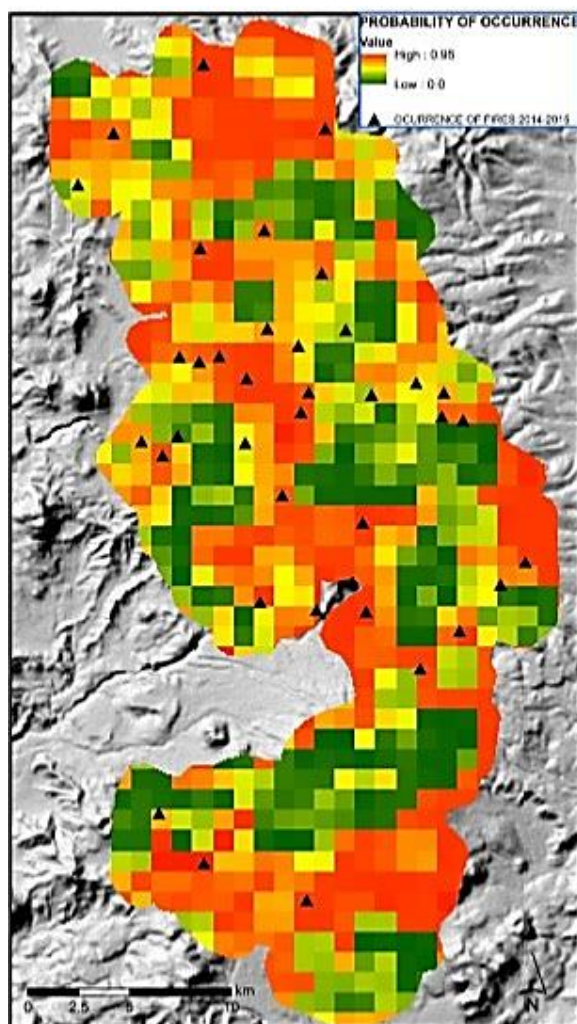
asentamientos humanos. Luego encontraron campos elevados para proteger cultivos de las inundaciones anuales al mismo tiempo de aprovechar el agua para su irrigación. Estos campos eran lo suficientemente grandes para producir cultivos (incluso algodón y alimentos básicos como maíz) para miles de habitantes, en otras palabras, una innegable señal de civilización. ¿Pero cómo tantos habitantes se ingeniaron para poblar un lugar de suelo tan estéril? Al cavarlo, se obtuvo la respuesta. Dondequiera crecía vegetación en abundancia, el suelo era negro: suelo mezclado con material orgánico parcialmente quemado, llamado biocarbon. Es probable que estos pueblos descubrieron el biocarbono por accidente, al dejar residuos orgánicos junto con otro desecho ardiendo en sus fuegos. A pesar de haber estado abandonada durante millares de años, aquí la tierra aún era fértil y húmeda, y producía exuberante vegetación en medio de una selva tropical infértil (Fragmento obtenido de Marris, 2006).



Figura 5. Carbono negro en la cuenca del Amazonas, Terra Preta

## 2.6 Incendios en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM)

En un estudio realizado por Farfán *et al.* (2018) menciona que, para los bosques de coníferas en la RBMM la ocurrencia de incendios está influenciada por sus características físicas y actividades antrópicas. Los incendios son más comunes en el borde del bosque, debido a que el borde es más seco y tiene mayor mortalidad del arbolado. Se encontró que la ocurrencia de incendios aumento con la población y la densidad de los bordes del bosque.



Fuente: Farfán et al., 2018

Figura 4. Localización de la RBMM y patrones de ocurrencia de fuego durante el periodo de 2014 a 2015



### 3. Conclusiones

El CN en los suelos forestales es originado por los incendios forestales y no debe servir de justificante para ocasionarlos. El CN parece ser abundante en los suelos de color negro y especialmente en aquéllos afectados por los incendios. Por su importancia en los suelos surge como respuesta para la mitigación del cambio climático por la capacidad de secuestro del carbono a largo plazo. Un aspecto importante es que la cantidad de CN en el suelo es igual a la suma de C contenido en los bosques y de CO<sub>2</sub> en el aire. Por tanto, el CN almacenado en los suelos debería ser cuantificado, según la literatura no contribuye al calentamiento global por ser un material recalcitrante lo cual es difícil descomponer por los microorganismos, pero que, al mismo tiempo, su presencia promueve el crecimiento de estos microorganismos y la descomposición de compuestos de carbono lábil. Además, es parte del ciclo del carbono, aunque algunos autores lo mencionan como el ciclo biogeoquímico del Carbono Negro. A pesar de que la mayoría de la bibliografía consultada refiere estimaciones de CN en la atmósfera y en los sedimentos marinos, la intención fue tratar de recopilar toda la información posible enfocada a

los suelos. Por lo tanto, el manejo forestal eficaz debe incluir prácticas de conservación de suelos y quemas controladas para mantener las reservas del CN del suelo.

Tal es el caso de Pérez-Salicrup *et al.* (2018), donde menciona que en México las quemas prescritas y las controladas son lineamientos de control que promueven la regeneración natural además de disminuir la carga de combustible (materia orgánica). Los autores Huang *et al.*, (2018) han sugerido que la producción de CN en el suelo por los incendios forestales probablemente incrementará derivado del calentamiento global, resultando en más CN almacenado en los suelos. Algunos estudios han mostrado que mucho del CN es almacenado en los suelos de bosque boreal (Ohlson *et al.*, 2009; Kasin *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2018) y, otro en bosque de coníferas (Kane *et al.*, 2010).

El almacén de CN en el perfil de suelo es un proceso importante para mitigar los efectos del cambio climático, debido a que el suelo, además de ser un sumidero, es un reservorio estable de carbono. La disminución de materia orgánica en el suelo forestal, y por tanto de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes, lleva consigo a la reducción de la población microbiana, cuya existencia es fundamental para la fijación del nitrógeno atmosférico y su paso a la forma nítrica, así como

para la transformación del fósforo insoluble en compuestos asimilables para las plantas.

## **Agradecimientos**

El primer autor agradece el apoyo del gobierno de México por ser beneficiaria de una beca de doctorado CONACyT para la realización de este trabajo.

## Referencias

- Binkley, D., Fisher R. 2013. *Ecology and Management of Forest Soils*. Editorial Wiley BlackWell.4th Ed. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030-5774, USA.,pp: 23-30.
- Bird, A.J., Wynn J. G., Saiz, G., Wurster C. M., McBeath A. 2015. The pyrogenic carbon cycle Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 43:273–298.
- Boot, C. M., Haddix, M., Paustian, K., y Cotrufo, M. F. 2015. Distribution of black carbon in ponderosa pine forest floor and soils following the High Park wildfire. *Biogeosciences* 12: 3029-2015.
- Carter, Z. W., Sullivan, B. W., Blank, R. R., Schmidt, C. A., Verburg, P. S. J. 2018. Charcoal Increases Microbial Activity in Eastern Sierra Nevada Forest Soils. *Forest*. 9: 93-100.
- Carvalho, E. O., Kobzia, L. N. R., Putz, F. E. 2011. Fire ignition patterns affect production of charcoal in southern forests. *International Journal of Wildland Fire* 3: 474-477.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D. 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research*. 113: G02027.
- Clark, J.S.; Patterson, W.A. 1997. Background and local charcoal in sediments: scales of fire

- evidence in the paleorecord. In *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*; Clark, J.S., Cachier, H., Goldammer, J.G., Stocks, B.J., Eds.; Springer Verlag: Berlin, Germany, pp. 23-48.
- CONAFOR 2010. *Sistema Nacional de Información*. Comisión Nacional Forestal, Ciudad de México, México. Disponible en:  
[www.conafor.gob.mx/portal/index.php](http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php).
- Cope, M.J., Chaloner, W.G. 1980. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition. *Nature*. 283:647-649.
- Crutzen, P.J., Andreae, M.O. 1990. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*. 250: 1669-1678.
- Crouzet, Y.; Marlow, W.H. 1995. Calculations of the equilibrium vapour-pressure of water over adhering 50–200 nm spheres. *Aerosol Sci. Technol.*, 22, 43-59.
- Dai, X.; Boutton, T.W.; Glaser, B.; Ansley, R.J.; Zech, W. 2005. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna. *Soil Biol. Biochem.*, 37, 1879-1881.
- Downie, A. E., Van Zwieten, L., Smernik, R. J., Morris S., Munroe, P. R. 2011. Terra Preta Australis: reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture Ecosystems and*

- Environment*. 140:137–147.
- Druffel, E.R.M. 2004. Comments on black carbon in the global carbon cycle. *Marine Chemistry*. 92:197-200.
- Farfán, Gutiérrez Michelle; Pérez-Salicrup Diego R; Flamenco-Sandoval, Alejandro; Nicasio-Arzeta Sergio; Mas, Jean-François y Ramírez, Ramírez, Isabel. 2018. Modelación de los factores antrópicos como conductores de la ocurrencia de incendios forestales en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*. vol. 24, núm. 3, e2431591.
- Foereid, B., Lehmann, J., Wurster, C., Bird, M. 2015. Presence of Black Carbon in Soil due to Forest Fire in the New Jersey Pine Barrens. *Earth Science and Engineering*. 5:91-97.
- Forbes, M. S., Raison, R. J., Skjemstad, J.O. 2006. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Sci. Total Environment*. 370:190–206.
- Glase, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. 1998. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific marker.
- Glaser, B., Haumaier, L. 2001. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agricultura in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 88:37-41.

- Goldberg, E.D. 1985. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution; Wiley: New York, NY, USA; p.198.
- Gyami Shrestha, Samuel J. Traina and Christopher W. Swanston. 2010. Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review. Sustainability. ISSN 2071-1050
- Hammes, K., Torn, M. S., Lapenas, A. G., Schmidt, M. W. I. 2008. Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soil. *Biogeosciences Discussions*. 5:661–683.
- Hedges, J.I.; Eglinton, G.; Hatcher, P.G.; Kirchman, D.L.; Arnosti, C.; Derenne, S.; Evershed, R.P.; Kögel-Knabner, I.; de Leeuw, J.W.; Littke, R.; Michaelis, W.; Rullkötter, J. 2010. The Sustainability, molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments. *Org. Geochem.* 2000, 31, 945-958.
- Hernández, Z., Almendros, G., Álvarez, A., Figueiredo, T., Carral, P. 2018. Soil carbon stabilization pathways as reflected by the pyrolytic signature of humic acid in agricultural volcanic soils, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,  
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.015>.
- Huang, W., Hu, Y., Chang, Y., Liu, M., Li, Y., Ren, B., Shi, S. 2018. Effects of fire severity and topography on soil black carbon accumulation in

- boreal Forest of Northeast China. *Forest*. 9, 408.
- Hubau, W., Van den Bulcke, J., Kitin, P., Mees, F., Van Acker, J., Beeckman, H. 2012. Charcoal identification in species-rich biomes: a protocol for Central Africa optimised for the Mayumbe forest. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 171:164–178.
- Jandl, Robert. 1997. Secuestro de carbono en bosques - El papel del suelo. Centro de Investigación Forestal, 1131 Viena, Austria.
- Kane, E. S., Hockaday, W. C., Turetsky, M. R., Masiello, C. A., Valentine, D.W., Finney, B. P., Baldock, J.A. 2010. Topographic controls on black carbon accumulation in Alaska black spruce forest soils: implications for organic matter dynamics. *Biogeochemistry* 100: 39-56.
- Kasin, I., Ellingsen, V.M., Asplund, J., Ohlson, M. 2016. Spatial and temporal dynamics of the soil charcoal pool in relation to fire history in a boreal forest landscape. *Canadian Journal of Forest Research*. 47 (1) DOI: 10.1139/cjfr-2016-0233.
- Knicker, H. 2011. Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments, *Quaternary International*. 243: 251–263.
- Kuhlbusch, T. A. J., Crutzen, P. J. 1996. Toward a global estimate of Black Carbon in residues of



- vegetation fires representing a sink of atmospheric CO<sub>2</sub> and a source of O<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles*. 9:491–501.
- Kuhlbusch, T.A. 1998. Black carbon in soils, sediments, and ice cores. *Environmental Analysis and Remediation* Volume 2. Meyers, R. A., ed. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Lehmann, J. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*. 249:343-357.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon, *Nature*. 447: 143–144.
- Lukac, M., Godbold, Douglas, L. 2013. Soil Ecology in Northern Forests: A Belowground View of a Changing World. Cambridge University Press. pp. 7-20.
- Masiello, C. A., Druffel, E. R. M. 1998. Black carbon in deep-sea sediments. *Science*, 280:1911–913.
- Masiello, C. A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry* 92:201-213.
- Nehls, T., Brodowski, S., Wessolek, G. 2010. Black Carbon in Paved Urban Soils, 12:, 8616.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., Certini, G. 2018. Relic charcoal hearth soils: A neglected carbon

- reservoir. Case study at Marsiliana forest, Central Italy. *Geoderma*, 315: 88–95.
- Niggemann, J. 2015. Utilizing colored dissolved organic matter to derive dissolved black carbon export by arctic rivers. *Front. Earth Science*. 3:63.
- NOAA/ESR. Mauna Loa Carbon Dioxide Recent Daily Average. Disponible online: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly) (revisado el 31 de Julio 2018).
- Ohlson, M. Dahlberg, B., Okland, T., Brown, K.J., Halvorsen, R. 2009. The charcoal carbon pool in boreal forest soils. *Nature Geoscience*. 2: 692–695.
- Pan Yude. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests *Science*. 333: 988.
- Pérez, S. D. R., Ortíz, M. R., Garduño, M. E., Martínez, T. H.L., Ocegüera, S. K. A., Quintero G. S., et al. 2018. Coordinación institucional para la realización de quemas prescritas y quemas controladas en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9:49.
- Rojas, G. F., Santoyo, G. G., Gómez, E., Velázquez, A. R., Pulido, P. J. I. 2017. La ciencia del suelo en el ciclo del carbono de México. Programa Mexicano del Carbono.
- Rosenzweig, C. Y., Hillel, D. 2000. Soil and global climate change: Challenges and opportunities. *Soil Science* 165: 47-56.

- Santín, C., Doerr, S., Evans K., Masiello C. A., Ohlson, M., De La Rosa J. M., Preston, Caroline M., Dittmar Thorsten. 2016. Towards a global assessment of pyrogenic carbon from vegetation fires. *Global Change Biology*.22:76-91.
- Serrato-C. R., S. M. Adame., L. G. José., F. R., David. 2015. Carbono Orgánico de la Hojarasca en los Bosques de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Caso Santuario Sierra Chincua. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*.
- Schmidt, M. W. I., Noack, A. G. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges, *Global Biogeochemistry Cycles*. 14: 777– 793.
- Schmidt, M.W.I.; Skjemstad, J.O.; Czimczik, C.I.; Glaser, B.; Prentice, K.M.; Gelinás, Y.; Kuhlbusch, T.A.J. 2001. Comparative analysis of black carbon in soils. *Global Biogeochem. Cycle.*, 15, 163-167.
- Shrestha, G., J. Traina, S., Swanston, C. W. 2010. Black Carbon's properties and role in the Environment: A comprehensive Review. *Sustainability*. 2: 294-320.
- Singh, N., Abiven, S., Torn, M. S., Schmidt, M.W.I. 2012. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale. *Biogeosciences*. 9: 2847–2857.

- Spokas, K.A., Novak, J.M., Masiello, C. A., Johnson, M.G., Colosky, E.C., Ippolito, J. A., Trigo, C. 2014. Physical disintegration of biochar: an overlooked process. *Environmental Science and Technology Letters*. 1:326–332.
- Stubbins, A., Spencer, R. G. M., Mann, P. J., Holmes, R. M., McClelland, J.W.,
- Turcios, M. M., Jaramillo, M. M. A., Vale, Jr., Fearnside, P.M., Barbosa, R.I. 2016. Soil charcoal as longterm pyrogenic carbon storage in Amazonian seasonal forests. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.13049.
- Suman, D.O.; Kuhlbusch, T.A.J.; Lim, B. 1997. Marine sediments: a reservoir for black carbon and their use as spatial and temporal records of combustion. In *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change*; Clark, J.S., Cachier, H., Goldammer, J.G., Stocks, B.J., Eds.; Springer Verlag: Berlin, Germany.
- Wagner, S., Ding, Y., Jaffé, R. 2017. A New Perspective on the Apparent Solubility of Dissolved Black Carbon. *Frontiers in Earth Science*. 5:75.
- Weil, R. R., Islam, K. R., Stin, M. A., Gruver, J. B., Samson, L. S. E. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*. 1:3-17.

- Wüthrich, C.; Schaub, D.; Weber, M.; Marxer, P.; Conedera, M. 2002. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. *Catena*, 48, 201–215.
- Yli-Halla, M., Rimhanen., Muurinen, K. J., Kaseva, J., Kahiluoto, H. 2018. Low black carbon concentration in agricultural soils of central and northern Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 631–632.
- Zhang, R.; Khalizov, A.F.; Pagels, J.; Zhang, D.; Xue, H.; McMurry, P.H. 2008- Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing. *PNAS*, 105, 10291-10296.

# **TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PORCINOS Y MITIGACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL: UNA REVISIÓN**

Sonia López Fernández<sup>1</sup>, Rodolfo Serrato Cuevas<sup>2</sup>,  
Gabriela Roa Morales<sup>1</sup> y Araceli Amaya Chávez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).sony75nov@hotmail.com,  
gabyroam@gmail.com, aamayac@uaemex.mx

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).rserratoc@uaemex.mx

## **1. Introducción**

La producción porcina mundial se ha incrementado en más de 3.5 veces durante los últimos 40 años (Pérez *et al.*, 2016). La producción mundial de cerdos para el año 2016 fue de 981 797 339 cabezas y una producción de carne de 98 163 256.59 millones de toneladas (FAO, 2016). Los tres principales países productores son: China con una aportación del 47.9 % del total de la producción, Estados Unidos con 10.4 % y Brasil con 3.4 %. La Unión Europea participó con el 21.6 % para el año 2016 y México ocupa el 9º lugar con una participación del 1.3 % del total de la producción

mundial de esta carne con 1.4 millones de toneladas (FIRA, 2017).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009) señala a la ganadería como mayor contribuidor de los problemas globales ambientales. Con emisiones estimadas de 7.1 giga toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente por año, representando el 14.5 % de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) inducidas por el hombre. La producción bovina de carne y leche contribuyen con un 41 % y 20 % respectivamente de las emisiones del sector, mientras que la carne de cerdo 9 % y la crianza de aves (carne y huevo) 8 % (Gerber *et al.*, 2013). La producción porcina es una fuente de contaminación reconocida, debido a la gran generación de estiércol (Cherubini *et al.*, 2015) (más de 2 billones de toneladas por día) (Mariscal, 2004; FAO, 2016) y al gran consumo de grano para la alimentación animal (138 Mt de cereales para forraje, proyecciones 2026) (OCDE/FAO, 2017). Esta actividad, a mediana o gran escala, genera agua de lavado, restos de alimentos, heces y orina, con una alta carga orgánica, comúnmente evacuadas en los sistemas de drenaje, pequeños cuerpos de agua superficial o directamente en el terreno (Montejo *et al.*, 2016).

Tradicionalmente en muchas partes del mundo, los estiércoles son aplicados al suelo agrícola como

entrada de nutrientes para el rendimiento en cultivos y forrajes. Pero hoy en día, en áreas con intensiva producción ganadera y poco suelo agrícola existe un superávit de nutrientes por el exceso en la producción de estiércol, los cuales requieren ser manejados (Corbala-Robles *et al.*, 2018). En los sistemas de producción intensiva de ganado en zonas periurbanas, los impactos asociados a la gestión del estiércol van desde zoonosis y la carga de olor, ruido, polvo y partículas finas en suspensión (PM2.5) (Wei *et al.*, 2016; Menzi *et al.*, 2010). Uno de los riesgos de enfermedades para la población es el consumo de agua contaminada con estiércol, ya que contiene bacterias patógenas como la *Escherichia coli* que causa diarrea y gases abdominales (LeJeune y Wetzel, 2007).

En México, la cría de cerdos es la tercera actividad ganadera más importante después de los bovinos y las aves (De-Victoria-Almeida *et al.*, 2008). Su producción creció a una tasa promedio anual de 2.2 % durante la década reciente (FIRA, 2017). Para el año 2015 se sacrificaron 16, 377, 498 cerdos para consumo de carne (SIAP, 2017), 1.38 millones de toneladas equivalentes en canal para el año 2016 (FIRA, 2017). El 76.5 % de la producción nacional para el año 2016, se concentró en seis entidades: Jalisco (20.7 % del total nacional), Sonora (17.3 %), Puebla (11.9 %), Yucatán (9.8 %),



Veracruz (8.8 %) y Guanajuato (8.1 %) (FIRA, 2017). El Estado de México se posicionó en el 11° lugar con una aportación acumulada al 30 de septiembre de 2018 de 15, 177 toneladas de carne de cerdo en canal (SIAP, 2018).

Esta importante agroindustria en México también presenta problemas ambientales y sociales debido a la contaminación de las aguas y del suelo que se encuentra a su alrededor que, además, son acompañados de malos olores (Garzón-Zuñiga y Buelna, 2014) y a medida que la demanda de carne de cerdo aumenta, se generan enormes cantidades de desechos, asociadas principalmente al incremento de estiércol y aguas residuales (Pérez *et al.*, 2016).

El sector ganadero mundial tiene una asociación de dos vías con el cambio climático: de una manera que conlleva una parte significativa de las emisiones de GEI antropogénicas, y por otro lado, puede desempeñar un papel importante en los esfuerzos de mitigación (Misra y Dey, 2014), i.e. producción de energía renovable y recuperación de nutrientes por el tratamiento adecuado de los residuos orgánicos. Diversas investigaciones (Castelo *et al.*, 2014; Jerónimo-Romero *et al.*, 2014; Riaño y García, 2015; Gooding y Meeker, 2016; Da-Cruz *et al.*, 2019), han reportado la digestión anaerobia o procesos de compostaje de los residuos orgánicos como estrategias de mitigación. El tratamiento

biológico de residuos orgánicos bajo condiciones anaerobias constituye una alternativa viable para estabilizar la materia orgánica, proteger el medio ambiente y reducir el riesgo a la salud pública; adicionalmente, se generan productos con valor agregado como son el biogás y el fertilizante orgánico que pueden ser empleados como fuente de energía alternativa y en las actividades agrícolas, respectivamente (Castelo *et al.*, 2014). Da-Cruz *et al.* (2019), estimaron la producción de CH<sub>4</sub> así como el potencial energético del sistema anaerobio para el tratamiento de residuos de comida de un restaurante, obteniendo 65.65 L/día de CH<sub>4</sub> en la semana y 87.54 L/día los fines de semana y días festivos, poniendo a disposición 6569.86 kWh mensuales de energía. Riaño y García (2015) reportaron una reducción anual de emisiones de metano de 72 % y 69 % con la implementación de una planta de tratamiento para estiércoles porcinos basada en la separación sólido-líquido, usando una prensa seguido de coagulación-floculación y nitrificación-desnitrificación de la fracción líquida, esta reducción de emisiones se transformó en un beneficio directo económico de 0.21 € por m<sup>3</sup> de estiércol generado. Una producción acumulada de biogás de 2401.90 L/kg SV fue reportada por Castelo *et al.* (2014) en un digestor anaerobio alimentado con 5% de residuos sólidos de frutas y vegetales.

Por otro lado, el compostaje aeróbico de cadáveres de animales que es otro tipo de residuo que se genera en una granja (tanto de lechones como adultos), es un método alternativo amigable con el ambiente. Las canales de animales pueden ser composteados, sí son mezclados o acomodados en capas con partes aproximadamente iguales de estiércol o agentes de carga como paja y aserrín (Gooding y Meeker, 2016). Jerónimo-Romero *et al.* (2014) investigaron la factibilidad de compostear cadáveres de conejo con diversos sustratos: paja de avena-estiércol, viruta de madera-estiércol y paja de avena, todos con y sin inóculo microbiano (*Streptomyces* spp., *Aspergillus* spp., *Cladosporium* spp.); encontraron mejores resultados con la mezcla de paja de avena y el inóculo no mostró diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre los tratamientos. Adicionalmente, la inactivación de virus durante el compostaje está determinada por una combinación de factores químicos, físicos y biológicos (Schwarz y Bonhotal, 2015).

Por todo lo anterior, es de gran importancia reconocer la utilidad que representa medir la sostenibilidad de un sistema a través de índices, para orientar las decisiones de desarrollo hacia términos y logros sostenibles que integren las tres dimensiones: ambiental, económico y social (Bechara *et al.*, 2014). El análisis de ciclo de vida (ACV) permite

una evaluación de la sostenibilidad ambiental de un producto o servicio (i.e. manejo del estiércol), a través de su ciclo completo de vida (ISO 14040 y 14044, 2006). En diferentes regiones del mundo se han aplicado ACV para la evaluación de los impactos ambientales de diferentes escenarios para manejo del estiércol porcino. Corbala *et al.* (2018) aplicaron un ACV para evaluar el tratamiento biológico de estiércol de cerdos contra la aplicación directa al suelo de cultivo en Bélgica. Los autores reportaron el impacto neto en el cambio climático en el escenario con tratamiento biológico de 46 % menos que en el escenario de aplicación directa al suelo. Los impactos a la salud humana y ecotoxicidad terrestre medidos como equivalentes de diclorobenceno (DB) ( $2.28E + 01$  kg 1.4-DB eq. y  $2.26E-01$  kg 1.4-DB eq., respectivamente) son similares en ambos escenarios. Sin embargo, no se pudo concluir directamente cuál de los dos tuvo el mejor desempeño ambiental. El objetivo del presente trabajo fue analizar los hallazgos en relación a las estrategias de mitigación de los impactos ambientales con el tratamiento de los residuos orgánicos de granjas porcinas.

## **2. Producción porcina mundial**

La FAO prevé que la producción mundial de carne (bovino, cerdo, ave y ovino) en 2018 aumente a 336 millones de toneladas en equivalente de peso en canal, es decir, un 1.7 por ciento (ó 6 millones de toneladas) más que en 2017, y el crecimiento más rápido desde 2013. La mayor contribución será principalmente por carne porcina según la balanza mundial con una producción pronosticada para el 2018 de 121.1 millones de toneladas y un 2 por ciento de variación respecto del 2017.

China continental quien es el principal productor de esta carne, ha incrementado de 9 millones de toneladas a 79 millones de toneladas en los últimos 35 años (Wang *et al.*, 2015). Se estima que la producción de carne de cerdo en China se ubique en 53.8 millones de toneladas en 2017, a pesar de la reducción de los apoyos gubernamentales y de las medidas ambientales más rigurosas en las provincias costeras para incentivar la reubicación de las operaciones de granjas porcinas hacia otras regiones donde el valor de la tierra es menor (FIRA, 2017). El ministerio de agricultura de ese país tiene un plan para transformar la porcicultura en cinco años (2016 a 2020), a fin de incrementar el tamaño de las granjas, la productividad y la eficiencia de la industria de alimentos y medicamentos veterinarios,

para mejorar la competitividad internacional de su porcicultura (USDA, 2017).

En 2016 la Unión Europea alcanzó su nivel máximo histórico en la producción de carne de cerdo (23.4 millones de toneladas). Lo anterior, impulsado por una expansión en el número de vientres, combinado con mayor productividad. Así, el número de lechones aumentó principalmente en España, Dinamarca y Alemania (FIRA, 2017).

Respecto a Estados Unidos, a finales de 2016 se reportó un inventario máximo histórico de cerdos y una tasa récord de cabezas sacrificadas a partir de la segunda mitad del año. Estos datos y las altas tasas de parición anticipan los aumentos en la producción que se pronostican para 2017 (11.7 millones de toneladas), así como menores precios del cerdo durante el año (FIRA, 2017).

Se prevé que el sector crezca vigorosamente en Asia, América y Europa, y los pronósticos indican que el comercio de carne se reforzará por el aumento de las importaciones de China, Japón y México (FAO, 2018).

### **3. Producción porcina en México**

La producción nacional de carne de cerdo registró una tendencia de crecimiento durante la década reciente, con una tasa de aumento promedio anual de

2.2 por ciento, para ubicarse en 1.38 millones de toneladas en 2016 (FIRA, 2017). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), esperan fuertes tasas de crecimiento de la producción durante el período 2017-2026 en México y otros países.

El crecimiento de la producción es resultado del incremento de cabezas sacrificadas y mayores pesos en los animales al momento del sacrificio. Los precios relativamente bajos de los alimentos y la mejora genética son la razón de mayores pesos al momento del sacrificio. Las mejoras genéticas se han reflejado en mejor productividad, debido a una mayor conversión alimenticia (FIRA, 2017; McAuliffe *et al.*, 2017), la cual también ha mostrado reducir impactos ambientales por unidad de cerdo (McAuliffe *et al.*, 2017). Sin embargo, la productividad se ve limitada por los continuos problemas de bioseguridad (diarrea epidémica porcina, síndrome respiratorio y síndrome reproductivo porcino), así como por la competencia de las importaciones (FIRA, 2017).

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés, USDA), el sector porcino mexicano se está consolidando a través de la integración vertical en

las granjas comerciales; la producción de cerdos será impulsada por la búsqueda de satisfacer la demanda interna y las exportaciones de carne roja (USDA-FAS, 2017). La producción se ve reforzada gracias al mejoramiento de la bioseguridad y la genética (FIRA, 2017).

#### **4. Residuos orgánicos porcinos**

Los principales residuos generados en una granja porcina son los purines de cerdo, una mezcla de heces, orina y agua de lavado (Cook *et al.*, 2015), ya que constituyen el mayor volumen tanto en forma sólida como líquida. Los purines también pueden incluir restos de alimentación dependiendo de la tecnificación de la granja y su manejo. Estos desechos se generan a través de la evacuación diaria de todos los animales. El agua residual generada en las granjas porcinas puede alcanzar grandes dimensiones (entre 35 a 50 L de agua de limpieza por animal) (Chao *et al.*, 2008; Blanco *et al.*, 2015) esto equivaldría aproximadamente a 34 362 906 m<sup>3</sup> diarios a nivel mundial en promedio, constituyendo un serio problema respecto a su confinamiento y manejo, por el impacto ambiental que originan (Cervantes *et al.*, 2007). En varios países el agua residual, normalmente es almacenada en pozos profundos o lagunas localizadas en áreas de



confinamiento dentro de las instalaciones (Cervantes *et al.*, 2007; Cook *et al.*, 2015; Gutiérrez *et al.*, 2016). El Manual de Bioseguridad en porcinos, publicado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Social, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), recomienda su tratamiento conforme a las normas ecológicas vigentes utilizando: lagunas de fermentación, lagunas de oxigenación, tanque esparcidor de excretas, separación de sólidos, uso de aguas tratadas para riego o producción de biogás. Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público están establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, y se describen en Tabla 1 (SEMARNAT, 1997).

Tabla 1. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público según establece la NOM-003-ECOL-1997

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	Huevos de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo	240	1	15	20	20

Servicios al público  
con contacto  
indirecto u  
ocasional

1000

5

15

30

30

---

Fuente: SEMARNAT, 1997

Otros residuos que se generan en una granja son, los restos de animales muertos (carcasas) tanto de lechones como adultos y son un fuerte problema en las unidades de producción debido a que son reservorio de parásitos, virus y bacterias, que tienen impactos adversos al ambiente y a la salud humana (Jerónimo-Romero *et al.*, 2014; Makan, 2015). Un cadáver está compuesto de material microbiológicamente activo que puede contener virus, bacterias, protozoos, parásitos, priones, toxinas, residuos de drogas o medicamentos y otros químicos (Berge *et al.*, 2009). Comúnmente las muertes son resultado de aplastamiento de las hembras e inanición en el caso de los lechones. Las causas de muerte en jóvenes y adultos dentro de una granja libre de epizootias son por riñas entre animales o úlcera gástrica. La Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE), publicó dentro del Código Terrestre como atender a la eliminación de animales muertos dentro de una granja; entre algunos de los métodos recomendados: incineración, inhumación, producción de biogás y elaboración de composta. No obstante, en este último, virus, bacterias esporíferas, como *Bacillus anthracis*, y agentes patógenos, como

*Mycobacterium tuberculosis*, sobrevivirán (OIE, 2018). Varios métodos simples y baratos son utilizados en pequeñas granjas tales como entierro y quema a cielo abierto, pero causan contaminación de agua y aire (Gooding y Meeker, 2016).

También son comunes otros residuos orgánicos en una granja provenientes de los partos de las cerdas tales como placentas, sangre y cordones umbilicales. El peso aproximado de los restos en cada parto es de 15 kilogramos. Resulta desafiante garantizar la bioseguridad en algún tratamiento como el pre-compostaje con estiércol y otros materiales, para la disposición final de este tipo de residuos (Gooding y Meeker, 2016).

## **5. Impactos ambientales y a la salud humana**

Las principales fuentes de contaminación de las granjas porcinas provienen de la producción de cultivos utilizados en la alimentación y de las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) de la cría de cerdos, así mismo de los sistemas del manejo del estiércol; siendo este último el de mayor importancia por el potencial de impacto ambiental (Gutiérrez *et al.*, 2016).

En México, la regulación y vigilancia gubernamental sobre el uso y manejo del estiércol

animal es escasa y confusa, y carece de especificaciones claras (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012). Cervantes *et al.* (2007) reportaron que, en el estado de Sonora, México, la industria porcina ha provocado efectos severos en el ambiente por la acumulación de desechos sólidos sin tratar y por la contaminación de diferentes cuerpos de agua donde son descargadas sus aguas residuales, así como también emisiones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . De Victoria-Almeida *et al.* (2008) reportaron que en México el 38 % de las granjas porcinas (principalmente pequeñas granjas), descargan directamente aguas residuales sin tratar a cuerpos de agua y suelo.

Las desventajas más importantes, principalmente para la población cercana a las granjas de cerdos, son las molestias de olores, riesgo higiénico, contaminación del ambiente por gas amoníaco, partículas suspendidas, y sobrecarga de nutrientes del estiércol en agua superficial y suelo (Schuchardt *et al.*, 2011). Uno de los riesgos de enfermedades para la población es el consumo de agua contaminada con estiércol, ya que contiene bacterias patógenas como *Escherichiacoli* que causa diarrea y gases abdominales (LeJeune y Wetzell, 2007). Sin embargo, si el estiércol es propiamente usado, podría significar un recurso valioso para cultivos, peces y producción de biogás (Gutiérrez *et al.*, 2016).

La generación de otros desechos orgánicos como restos de animales producen patógenos, olores fétidos y tienen impactos adversos al ambiente y a la salud humana (Makan, 2015). Es común la incineración de estos tipos de residuos, en pocas cantidades, para su disposición final; volúmenes mayores requieren un uso substancial de diésel lo que implica un incremento en la contaminación (Ahn *et al.*, 2007).

## **6. Estrategias de mitigación**

La Tabla 2 muestra diversas investigaciones que han reportado la utilización de estrategias de mitigación como digestión anaerobia o procesos de compostaje de los residuos orgánicos generados en la producción de animales para consumo de carne al derredor del mundo.

### *6.1. Digestión anaerobia*

La digestión anaerobia es un proceso biológico donde consorcios de microorganismos en ausencia de oxígeno son capaces de degradar la materia orgánica permitiendo la formación de una mezcla de gases, llamada biogás, constituido principalmente por  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , y adicionalmente sedimentos estabilizados que pueden ser utilizados como abono

orgánico (Medina-Herrera *et al.*, 2014). Esta tecnología es aplicada mundialmente debido a su capacidad de producir metano como fuente de energía renovable, así como también para recuperación de nutrientes (N y P) (Romero *et al.*, 2016). Alemania es el país que encabeza la producción de biogás por medio de digestión anaerobia con biomasa agrícola principalmente de ensilados de maíz y solo utilizan los subproductos de la cría de animales por su potencial para la generación de energía eléctrica (Fuchsz y Kohlheb, 2015). Este país en el año 2012 contaba con 7, 874 plantas y la producción bruta de electricidad fue de 27, 239 GWh/a. En Brasil casi el 20 % de las fincas utilizan biodigestores con quemadores, para el sistema de gestión del estiércol, debido principalmente al potencial de reducción de las emisiones de GEI; esto por la conversión de emisiones de CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> en los procesos de combustión (es decir, llamaradas), en calor o energía eléctrica (Cherubini *et al.*, 2015). Sin embargo, cuando la fracción sólida ingresa a los digestores no se logra la remoción de N y P, y disminución en su volumen (Kunz *et al.*, 2009), por lo cual una alternativa para el manejo de la fracción sólida del estiércol sería el compostaje (Cherubini *et al.*, 2015). Desde el punto de vista económico, la implementación de tecnologías de tratamiento

anaerobio de residuales porcinos es ventajosa ya que el período de recuperación de la inversión no excede los 2 años según concluyen Alonso-Estrada *et al.* (2014) en su investigación de cinco casos de estudio de granjas porcinas aplicando el tratamiento anaeróbico tipo cúpula fija de residuales porcinos para la producción de biogás.

El biogás producido puede ser quemado en una turbina de gas o motores de combustión interna, los cuales generan electricidad y calor; diversos investigadores realizan adaptaciones a motores convencionales y los operan con biogás para generar electricidad, sin embargo, los motogeneradores con biogás son más costosos en la actualidad (Venegas *et al.*, 2017).

Chao *et al.* (2008) realizaron un estudio del comportamiento de un biodigestor de bolsa plástica de 12.3 m<sup>3</sup> donde reportaron una producción de 3.49 m<sup>3</sup> de biogás y una remoción de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO) de 74 %, 69 % y 71 % respectivamente. Un estudio de producción de biofertilizantes mediante digestión de excreta de cerdo realizado en el estado de Yucatán por Soria *et al.* (2001), reveló que el prototipo de digestor tipo FAO funcionó adecuadamente con un tiempo de maduración del efluente de 50 días, 210 mg/L de sólidos sedimentables, 0 UFC/mL de coliformes, pH

7, CE 4 dS/m, DQO 1399 mg/L y DBO 172 mg/L. Niu *et al.* (2011), reportaron una producción acumulada de biogás de 24,830 mL en 30 días de fermentación anaerobia de estiércol porcino con paja de maíz con una relación 1:1.5 respectivamente.

Un estudio más de Amaral *et al.* (2014), mostró que la producción de biogás está directamente relacionada con el incremento de carga orgánica; se alcanzó una capacidad máxima de generación de biogás de 0.869 Nm<sup>3</sup>/kg SV agregados, con una carga orgánica de 1.853 ± 0.016 Kg SV/m<sup>3</sup> día.

Venegas *et al.* (2017), concluyeron que el estado de Puebla tiene un gran potencial para que sus granjas porcinas con más de 500 cerdos puedan ser autosuficientes en energía eléctrica al emplear sus desechos en biodigestores-motogeneradores con una relación beneficio costo de 1.67 %. Granjas de 2 000, 3 000 y 5 000 cerdos cuentan con suficiente biogás incluso para operar otro motogenerador y la relación beneficio costo desde 2.17 % hasta 3.07 % respectivamente. Escalera *et al.* (2014), evaluaron proyectos de mecanismo de desarrollo limpio (MDL) de granjas porcinas en México, la evaluación financiera contempló la adquisición, instalación y costos de mantenimiento de un motogenerador de 60 kW con 15 horas de operación durante 365 días, este estudio demostró que el motogenerador operado con biogás es rentable para las granjas al generar su



propia energía. Obtuvieron indicadores financieros muy altos, por ejemplo, tasa interna de retorno (TIR) con valores entre 30.34 y 152.58 %, considerando una tasa de actualización de 12 %.

Un aspecto de suma importancia que se debe tener en consideración para el uso del efluente como abono orgánico para cultivos agrícolas o como agua de riego es el parámetro bacteriológico (cantidad de coliformes fecales), ya que según las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) establecen un máximo de 1000 UFC/100 ml coliformes fecales para irrigación en cultivos de consumo crudo, industriales, forrajes, pastos y árboles (Branda *et al.*, 2016). Estos mismos autores reportaron en sus pruebas bioquímicas de afluente y efluente de estiércoles porcinos no existen diferencias estadísticas en la cantidad de coliformes fecales, debido principalmente a las bajas temperaturas registradas durante su trabajo, por lo cual, no se recomiendan para uso en la agricultura; ellos encontraron en el efluente porcino principalmente las especies de *Proteus* spp, *Escherichia coli*, *Klebsiella*, *Citrobacter freundii*.

Cruz *et al.* (2004), reportaron un conteo de microorganismos mesófilos viables, anaerobios y coliformes fecales en residual de entrada y salida de un digestor anaerobio tipo cúpula fija con aguas residuales porcinas; en el caso de coliformes fecales

en el residual de entrada fue de 7, 866 y en salida de 4, 529 UFC/mL con una remoción del 42.42 %. Aunado a esto, es necesario realizar pruebas fitopatológicas de los efluentes para corroborar el uso seguro en la producción agrícola. Bioensayos ecotoxicológicos sensibles y simples como germinación de semillas y elongación de raíces fueron realizados por Priac *et al.* (2017), para evaluar aguas residuales contaminadas con metales pesados. Dichos autores evaluaron 4 variedades de lechuga (*L. sativa* L.), encontrando que después de comparar el índice de germinación con los valores de conductividad eléctrica, la variedad *Appia* fue más sensible y las otras tres (*Batavia dorée de printemps*, *Grosse blonde paresseuse*, y *Kinemontepas*) más resistentes a la toxicidad.

Gerber *et al.* (2017) reportaron fitotoxicidad del afluyente y efluente de un rastro porcino usando semillas de lechuga y calabaza como bioindicadores; el índice de germinación de la semilla de lechuga mostró una correlación negativa ( $p < 0.05$ ) con el nitrógeno (-0.93) en el afluyente y ambas semillas una correlación negativa con el Zn (lechuga -0.63 y calabaza -0.64) en el efluente tratado. En adición, los efluentes provenientes del manejo del estiércol son también fuente de agua que pueden aprovechar las plantas junto con los nutrimentos en una solución nutritiva y en un sistema hidropónico (Capulín

*et al.*, 2011) propiciando en zonas donde el recurso hídrico es escaso, se puedan producir alimentos en pequeñas áreas (Godínez *et al.*, 2007).

La utilización de los efluentes de estiércol puede ser una alternativa viable y económica en la producción de hortalizas en invernadero con hidroponía, ya que se da la utilización de un desecho contaminante de fácil y simple obtención, evitando el uso de fertilizantes químicos de alta solubilidad, que en la mayoría de las ocasiones son costosos y más propensos a contaminar el ambiente (Capulín *et al.*, 2011).

Tabla 2. Investigaciones sobre estrategias de mitigación de residuos orgánicos porcinos y otros tipos de residuos orgánicos

Estrategia	Residuo	Producto	Autores/País	Año
Digestión anaerobia	Ensilados de maíz	Biogás para electricidad	Fuchsz y Kohlheb	2015
	Estiércol		Alemania	
	Purines de cerdo	Biogás 3.49 m <sup>3</sup>	Chao <i>et al.</i> /Cuba	2008
	Excreta de cerdo/paja de maíz	Biogás 24,830 mL	Niu <i>et al.</i> /China	2011
	Estiércol de cerdo	Biogás para producir 60 kWh	Escalera <i>et al.</i> /México	2014

Compostaje	Cadáveres de conejo	Compost inactivación de virus	Jerónimo-Romero <i>et al.</i> /México	2014
	Bovinos enfermos	Compost	Zeng <i>et al.</i> / Nueva Escocia	2012
	Canales de cerdo	Compost 86% degradabilidad	Ahn <i>et al.</i> / EUA	2007
	Mortalidad de conejos y pollos	Compost	Pagans <i>et al.</i> / España	2006

## 6.2. Compostaje aeróbico

El compostaje es el método más adecuado en el tratamiento eficaz de desechos orgánicos para obtener un producto higiénicamente seguro y económicamente rentable (Kulcu y Yaldiz, 2007; Szabová *et al.*, 2010). El compostaje de purines de cerdo tiene algunas ventajas: los purines líquidos son convertidos a sólidos con baja humedad, el volumen y peso de este material es reducido y el producto ya estable es más fácilmente transportado desde el sitio (Cook *et al.*, 2015). Durante el compostaje, los materiales orgánicos desglosados y descompuestos por microorganismos bajo condiciones aeróbicas, liberan CO<sub>2</sub> como emisión gaseosa (Bong *et al.*, 2017). La conservación de nutrientes en el producto final de un proceso de compostaje es importante

para no afectar su valor agronómico y su potencial como abono orgánico (López-Fernández *et al.* 2018).

Un estudio realizado por Ahn *et al.*, (2007) evaluó la biodegradabilidad de canales de cerdos en un sistema de compostaje de aireación pasiva bioseguro, observando que el producto final obtenido de la mezcla de las canales y paja de maíz (259 kg y 694 kg, respectivamente) tuvo una degradabilidad del 86 % durante las primeras 6 semanas del proceso. Las emisiones de gases efecto invernadero incluyen  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , y  $\text{CH}_4$  como los principales gases que contribuyen al potencial de calentamiento global derivados de los procesos de compostaje, por lo cual, es de suma importancia incluir al proceso algunas estrategias de mitigación como agregar agente de carga, sistema de aireación, agente químico o la utilización de composta madura (Bong *et al.*, 2017).

Los coliformes fecales pueden sobrevivir en condiciones aeróbicas y anaeróbicas y es común su presencia al inicio de un proceso de compostaje; por lo tanto, los coliformes fecales son un indicador para determinar si el método elegido para la reducción de los mismos ha reunido los requerimientos de suficiente temperatura, tiempo y mezclado (Makan, 2015). El calor generado durante la fase termófila del compostaje es el encargado de la reducción o

eliminación de patógenos, aunque también, estos son inactivados por la degradación microbiana y el amonio (Schwarz y Bonhotal, 2015).

De acuerdo a Zeng *et al.* (2012), la fase termófila (55 a 65°C) fue observada en sus tratamientos de compostaje de materiales de riesgo especificados (SRM por sus siglas en inglés) (mortalidad de ganado bovino enfermo de encefalopatía espongiiforme bovina) mezclado con paja de trigo o aserrín de madera blanda; los resultados indicaron que el compostaje de SRM con paja de trigo o aserrín produjeron un composta madura con valores de 0.199 y 0.167 mg CO<sub>2</sub>-C/g de materia orgánica d, respectivamente. Pagans *et al.* (2006) realizaron compostaje de restos de animales (conejos y pollos) principalmente de vísceras, a escala laboratorio, para evaluar la emisión de amonio durante el proceso, encontrando una emisión acumulativa de 14.1 g NH<sub>3</sub>/kg N. El contenido de nitrógeno lo utilizaron como indicador de la actividad de los microorganismos en el compostaje, el valor obtenido indica la relación C/N en los tejidos tratados.

## **7. Evaluación ambiental**

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite una evaluación de la sostenibilidad ambiental de un producto o servicio a través del análisis de los procesos de su ciclo de vida completo (ISO 14040 y ISO 14044, 2006). Cuantifica, evalúa,

compara y mejora la producción de bienes y servicios en términos de su potencial de impactos medioambientales (Reckmann *et al.*, 2012). La aplicación del ACV permite optimizar productos y procesos identificando sus impactos más significativos, por estas razones, es considerada la mejor herramienta para evaluar el desempeño medioambiental de sistemas de gestión de residuos (Bovea *et al.*, 2016; Arena *et al.*, 2003). El ACV permite evaluar, desde una perspectiva global, todos los impactos ambientales que ocasiona la gestión integral de los residuos, facilitando la comparación entre distintas alternativas de tratamiento (McDougall *et al.*, 2008; Laurent *et al.*, 2014). Esta metodología incluye 4 etapas: definición de los objetivos y alcance del estudio, análisis de inventario, evaluación de los impactos e interpretación (ISO 14040, 2006). La definición de los límites del sistema es un elemento importante en el modelaje del ACV, ya que definen todos los procesos a ser considerados (Elwan *et al.*, 2015). Esta evaluación ha sido usada en diversos escenarios para el manejo del estiércol en diferentes áreas geográficas (Lijó *et al.*, 2014; Gutiérrez *et al.*, 2016; Vergé *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Corbala-Robles *et al.*, 2018). La Tabla 3, muestra el uso del ACV para evaluar la mitigación de los impactos producidos por el aprovechamiento de los residuos

generados en la producción porcina. Se analizan diferentes categorías de impacto como: potencial de calentamiento global (PCG), cambio climático (CC), potencial de acidificación del suelo (PA), potencial de eutrofización (PE), y el agotamiento abiótico de combustibles fósiles (AACF), entre otras (Gutiérrez *et al.*, 2016).

Tabla 3. Investigaciones sobre aplicaciones de Análisis de Ciclo de vida (ACV) en la evaluación de los impactos generados en la producción porcina

Temática del ACV	Unidad funcional	Límites del sistema	Categorías de impacto	Resultados	Región	Autores
Producción de cerdos	1 cerdo finalizado	Gestación/ 120 kg de peso vivo	PCG, TH, TT, PA, PE	1019 kgCO <sub>2</sub> eq PCG, 36 kg TH	Cuba	Gutiérrez <i>et al.</i> , 2016
	215 cabezas de cerdos/año	Cultivos/ cerdos finalizados	PCG	ENGEI 248.53 kg CO <sub>2</sub> eq/215ce/año 35.92% CAS	China	Li <i>et al.</i> , 2017
Digestión anaerobia	1 ton de estiércol de cerdo	Colección de estiércol de cerdo hasta fertilización	CC, AO, PA, PE	CC -73.5 kg CO <sub>2</sub> eq PA -0.94 kg SO <sub>2</sub> eq Todas las Categorías negativas	Italia	Lijó <i>et al.</i> , 2014
	1 kWh exportado a la red	Construcción de la planta de DA hasta kWh	PCG,PA, PE	PCG 4005 kg CO <sub>2</sub> eq; PE 5.65 kg PO <sub>4</sub> eq; PA 20.49 kg SO <sub>2</sub> eq	Hungría	Fuchs y Kohlheb, 2015



Manejo de residuos	1 m <sup>3</sup> de estiércol crudo	Planta de tratamiento, de agua residual	CC, TH, ETT	50% de mitigación en CC, TH, PE, US con substituir el fertilizante	Bélgica	Corbala-Robles <i>et al.</i> , 2015
--------------------	-------------------------------------	---	-------------	--	---------	-------------------------------------

PCG: potencial de calentamiento global, TH: toxicidad humana, TT: toxicidad terrestre, PA: potencial de acidificación, PE: potencial eutrofización, HC: huella de carbono, ENGEL: emisión neta de gases efecto invernadero, CC: cambio climático, CAS: carbono almacenado en suelo, ETT: toxicidad terrestre, AO: agotamiento de ozono, US: uso de suelo.

La cuantificación de los impactos ambientales de la producción porcina de Gutiérrez *et al.* (2016), resultó en un impacto por cerdo terminado de 120 kg de peso vivo de 1892 MJ de agotamiento abiótico de combustibles fósiles. Como se observa en la tabla 3 las categorías de impacto ambiental del potencial de calentamiento global y toxicidad humana contribuyen mayormente a la generación de impactos ambientales negativos en comparación con las otras categorías determinadas 17 kg 1,4-DB-eq en toxicidad terrestre, 1 kg de 1,4-etileno-eq en formación de foto oxidantes, 12 kg-SO<sub>2</sub>-eq en el potencial de acidificación y 6 kg de PO<sub>4</sub>-eq en el potencial de eutrofización. Estos resultados muestran que las principales oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de las granjas porcinas es reducir las emisiones al ambiente con un tratamiento de los residuos generados en la granja.

La investigación de Li *et al.* (2017), evaluó las causas de las diferentes emisiones de GEI en dos

sistemas de producción de cultivos y cría de cerdos (separados e integrados). Los resultados muestran que las emisiones netas de GEI por los sistemas de producción integrado y separado fueron 24,917.95 kg CO<sub>2</sub>-eq/ha/año y 27,732.70 kg CO<sub>2</sub>-eq/ha/año, respectivamente, para 215 cabezas de cerdos. El sistema integrado redujo los GEI en 1381.33 kg CO<sub>2</sub>-eq/año principalmente debido al reciclaje y la reutilización del estiércol en tierras de cultivo. El sistema integrado también aumentó el almacenamiento de carbono en el suelo en un 35.92 % en comparación con el sistema separado, aunque aumentó las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O del suelo. Estos resultados indican que, a través de una serie de métodos como reciclamiento de residuos agrícolas, los sistemas integrados podrían reducir las emisiones en un 10.15 %, comparado con los sistemas separados.

En el tenor del manejo de residuos orgánicos porcinos, Lijó *et al.* (2014) reportaron en la categoría de CC -73.05 kg de CO<sub>2</sub> eq por cada tonelada de purines de cerdo que alimentaban el digestor anaerobio, estos resultados fueron debido a créditos acumulados (disminución de emisiones de GEI) por evitar el manejo convencional de purines de cerdo (traslado y almacenados con gasto de combustible y emisiones al aire por la degradación de la materia orgánica). Por otro lado, Corbala-

Robles *et al.* (2018), señalaron que de sus dos escenarios (E1: Escenario con tratamiento del estiércol, E2: Escenario sin tratamiento del estiércol), la categoría de CC fue 46% más baja en E1 que en E2. Otro estudio de Kuhn *et al.* (2018), evaluó el impacto ambiental de 1 m<sup>3</sup> de estiércol porcino excretado, en escenarios con o sin transporte (Trans y Ref, respectivamente) del estiércol a los sistemas agrícolas del noreste de Alemania. En este país y algunos otros de la Unión Europea, la producción ganadera intensiva está altamente concentrada geográficamente y existen regiones con excedentes de N y P. Esto representa una amenaza, por la pérdida de nutrientes, para la calidad del aire y del agua, la biodiversidad y el clima. Los resultados indicaron que transportar el estiércol a zonas agrícolas, reduce todos los valores de los indicadores de impacto ambiental evaluados, comparado a una situación sin transporte, esto es causado principalmente, por un aumento en la eficiencia del uso de nutrientes y el ahorro en fertilizantes químicos. La categoría de impacto PCG fue 39.17 % más bajo en el escenario Trans comparado al escenario Ref. La categoría de impacto PA fue 6.99 % más bajo en Trans en comparación con Ref. La reducción se logró a través del ahorro en la producción de fertilizantes químicos y su aplicación (0.51 kg SO<sub>2</sub> eq m<sup>3</sup>) que compensa un ligero

aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) del transporte (0.04 kg de SO<sub>2</sub> eq m<sup>3</sup>).

A través del ACV, Fuchsz y Kohlheb (2015) encontraron que la digestión anaerobia de estiércoles porcinos para la producción de electricidad genera una mayor mitigación en la categoría de potencial de acidificación en comparación con la digestión anaerobia de residuos agrícolas o de la mezcla de estiércoles porcinos y residuos agrícolas. Al mismo tiempo, la producción de biogás basada únicamente en residuos agrícolas tiene el peor potencial de acidificación debido al alto combustible fósil demandado en el cultivo y el transporte de la materia prima.

## **8. Conclusiones**

El análisis presentado en este escrito muestra que las estrategias de mitigación como digestión anaerobia y compostaje de residuos orgánicos porcinos juegan un papel importante en los esfuerzos de mitigación del impacto ambiental.

La digestión anaerobia es ampliamente utilizada alrededor del mundo para reducir las emisiones de gases efecto invernadero por el manejo del estiércol. Además, ofrece beneficios al obtenerse energía renovable a través de la obtención de biogás, energía

eléctrica y la recuperación de nutrientes por medio de los bioles obtenidos que pueden ser aprovechados como fertilizantes.

Por otro lado, el compostaje anaerobio es una alternativa amigable con el ambiente para la reducción de residuos orgánicos porcinos como estiércol y tejidos de animales y como sustituto de fertilizantes sintéticos. El producto obtenido puede estar libre de patógenos siempre y cuando el proceso cumpla con los parámetros adecuados de altas temperaturas, humedad y aireación.

El Análisis de Ciclo de Vida es utilizado como una herramienta adecuada para la evaluación del impacto ambiental en los sistemas de aprovechamiento de los residuos orgánicos porcinos. Varios estudios mostraron reducción de los impactos en categorías como: Cambio climático, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad Terrestre, al aplicarse estrategias de mitigación dentro de los sistemas de crianza porcina.

## Referencias

- Ahn, H. K.; Glanville, T. D.; Crawford, B. P.; Koziel, J. A.; Akdeniz, N. Evaluation of the biodegradability of animal carcasses in passively aerated bio-secure composting system. *Agricultural and Biosystems Engineering Conference Proceedings and Presentations*, 2007, 75.
- Alonso-Estrada, D.; Lorenzo-Acosta, Y.; Díaz-Capdesuñer, Y. M.; Sosa-Cáceres, R.; Angulo-Zamora, Y. Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 2014, 48(3), 16-21.
- Amaral, A. C. D.; Kunz, A., Steinmetz, R. L.; Cantelli, F.; Scussiato, L. A.; Justi, K. C. Swine effluent treatment using anaerobic digestion at different loading rates. *Engenharia Agrícola*, 2014, 34(3), 567-576.
- Arena U.; Mastellone M.L.; Perugini F. Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *International Journal Life Cycle Assessment*, 2003, 8 (2), 92-98.
- Bechara, D. Z.; Martínez, S. J.; Romero, P. J.; Bustillo, G. L. Determinación de variables críticas de sustentabilidad en agroecosistemas

- porcinos. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 2014, *Supl. 1*, 834-844.
- Berge, A. C. B.; Glanville, T. D.; Millner, P. D.; Klingborg, D. J. Methods and microbial risks associated with composting of animal carcasses in the United States. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 2009, *234(1)*, 47-56.
- Blanco, D.; Suárez, J.; Jiménez, J.; González, F.; Álvarez, L. M.; Cabeza, Evelyn; Verde, J. Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 2015, *38 (4)*, 441-447
- Bong, C. P. C.; Lim, L. Y.; Ho, W. S.; Lim, J. S.; Klemeš, J. J.; Towprayoon, S.; Lee, C. T. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 2017, *146*, 149-157.
- Bovea, M. D.; Cruz-Sotelo, S. E.; Mercante, I.; Coutinho-Nóbrega, C.; Eljaiek-Ursola, M.; Ibáñez-Flores, V. Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión de residuos en Iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2017, *32*, 23-46.
- Branda, L. N.; Ruíz Díaz, A.; Ramírez, M.; Martínez, J. Evaluación de coliformes fecales en efluentes de una exportación porcina sometidas a

- tratamiento mediante biodigestor tubular con régimen de carga estacionada. *Compendio de Ciencias Veterinarias*, 2016, 6(2), 7-12.
- Capulín, J.; Núñez, R.; Aguilar, J.; Estrada, M.; Sánchez P.; Mateo, J. Uso de estiércol líquido de bovino acidulado en la producción de pimienta morrón. *Revista Chapingo Serie Hortícola*, 2007, 13 (1), 5-11.
- Castelo, P.; Peñafiel, R.; Ochoa-Herrera, V. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste in semi-continuous reactors from a municipal market in Tumbaco, Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 2014, 6 (2), 31-39.
- Chao, R.; Sosa, R.; Pérez, A. A.; Cruz, E. A study on pig wastewater treatment with low cost biodigesters. *Livestock Research for Rural Development*, 2008, 20 (9), 149.
- Cherubini, E.; Zanghelini, G. M.; Alvarenga, R. A. F.; Franco, D.; Soares, S. R. Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87, 68-77.
- Cervantes, F. J.; Saldívar-Cabrales, J.; Yescas, J. F. Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 2007, 3 (1), 3-12.



- Cook, K. L.; Ritchey, E. L.; Loughrin, J. H.; Haley, M.; Sistani, K. R.; Bolster, C. H. Effect of turning frequency and season on composting materials from swine high-rise facilities. *Waste management*, 2015, 39, 86-95.
- Corbala-Robles, L.; Sastafiana, W. N. D.; Volcke, E. I. P.; Schaubroeck, T. Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application– a trade-off story. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 131, 86-98.
- Cruz, E.; Martínez, V.; Naranjo, R.; Sosa, R. Evaluación microbiológica del efluente anaerobio de un biodigestor de cúpula fija. *Revista Computarizada de Producción Porcina*, 2004, 11 (2), 89-95.
- Da Cruz, H. M.; Barros, R. M.; Dos Santos, I. F. S.; Tiago Filho, G. L. Study of the potential of generation of electric energy from the biogás of digestion anaerobia of food residues. *Research, Society and Development*, 2019, 8 (5), 3785811.
- De Victorica-Almeida, J. L.; Galván-García, M.; Ayala-Ruiz, R. Sustainable Management of effluents from small piggery farms in Mexico. *American Journal of Environmental Sciences*, 2008, 4(3), 185-188.
- Elwan, A.; Arief, Y. Z.; Adzis, Z.; Muhamad, N. A. Life cycle assessment-based environmental

- impact comparative analysis of composting and electricity generation from solid waste. *Energy Procedia*, 2015, 68, 186-194.
- Escalera Ch. M. E.; Gallegos F. G.; Leal V. J. C. Clean energy a CDM project option. *European Scientific Journal*, 2014, 10 (15), 326-338.
- FIRA. Panorama Agroalimentario, Carne de cerdo 2017. Disponible en línea:  
<http://www.ugrpg.org.mx/pdfs/Panorama%20Agroalimentario%20Carne%20de%20cerdo%202017.pdf> (24 de octubre de 2018).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of food and agriculture-livestock in the balance. 2009; (31 de octubre 2018).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponible en línea:  
<http://www.fao.org/faostat/es/#data/QA/visualize> 2016; (31 de octubre 2018).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Perspectivas alimentarias, resúmenes de mercados. Disponible en línea:  
[www.fao.org/3/CA0910ES/ca0910es.pdf](http://www.fao.org/3/CA0910ES/ca0910es.pdf) 2018; (28 de octubre de 2018).
- Fuchsz, M.; Kohlheb, N. Comparison of the environmental effects of manure-and crop-based agricultural biogas plants using life cycle

- analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86, 60-66.
- Garzón-Zúñiga, M. A.; Buelna, G. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2014, 30(1), 65-79.
- Gerber, M. D.; Lucia, T.; Correa, L.; Neto, J. E. P.; Correa, É. K. Phytotoxicity of effluents from swine slaughterhouses using lettuce and cucumber seeds as bioindicators. *Science of the Total Environment*, 2017, 592, 86-90.
- Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A.; Tempio, G. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013, Rome, pp.115.
- Godínez, M.L.; García, S.J.A.; Fortis, H.M.; Mora, F.J.S.; Martínez, D.M.Á.; Valdivia, A.R.; Hernández, M.J. Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 2007, 25 (1), 51-59.
- Gooding, C. H.; Meeker, D. L. Comparison of 3 alternatives for large-scale processing of animal carcasses and meat by-products. *The Professional Animal Scientist*, 2016, 32(3), 259-270.

- Gutiérrez, A. S.; Eras, J. J. C.; Billen, P.; Vandecasteele, C. Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management. *Journal of cleaner production*, 2016, 112, 2518-2528.
- ISO 14040. Environmental management—life cycle assessment —principles and framework. International Standard 14040. *International Organisation for Standardisation*, 2006, Geneva.
- ISO 14044. Environmental management – life cycle assessment – requirements and International Organization for Standardization 14044. *International Organisation for Standardisation*, 2006, Geneva.
- Jerónimo-Romero, Y.; Miranda-Romero, L. A.; Saavedra-Jiménez, L. A. Compostaje de mortalidad de conejo en la granja experimental de la universidad autónoma Chapingo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2014, 17(2), 295-297.
- Kuhn, T., Kokemohr, L.; Holm-Müller, K. A life cycle assessment of liquid pig manure transport in line with EU regulations: A case study from Germany. *Journal of environmental management*, 2018, 217, 456-467.
- Kulcu R.; Yaldiz O. Composting of goat manure and wheat straw using pine cones as a bulking agent.

- Bioresource Technology*, 2007, 98 (14), 2700-2704.
- Kunz, A.; Higarashi, M.M.; Oliveira, P.A.V. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. *Cuadernos de Ciência & Tecnologia*, 2005, 22, 651-665.
- Laurent, A.; Clavreul, J.; Bernstad, A.; Bakas, I.; Niero, M.; Gentil, E.; Hauschild, M. Z. Review of LCA studies of solid waste management systems—Part II: Methodological guidance for a better practice. *Waste management*, 2014, 34(3), 589-606.
- LeJeune, J.T.; Wetzel, A.N. Preharvest control of *Escherichia coli* O157 in cattle. *Journal of Animal Science*, 2007, 85, 73-80.
- Li, Z.; Sui, P.; Wang, X.; Yang, X.; Long, P.; Cui, J.; Chen, Y. Comparison of net GHG emissions between separated system and crop-swine integrated system in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149, 653-664.
- Lijó, L.; González-García, S.; Bacenetti, J.; Fiala, M.; Feijoo, G.; Moreira, M. T. Assuring the sustainable production of biogas from anaerobic mono-digestion. *Journal of cleaner production*, 2014, 72, 23-34.
- López-Fernández, S.; Serrato-Cuevas, R.; Castelán-Ortega, O. A.; Avilés-Nova, F. Comparación

- entre dos métodos de ventilación en la composición química de compost de estiércoles pecuarios. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2018, 34 (2), 263-271.
- Makan, A. Windrow co-composting of natural casings waste with sheep manure and dead leaves. *Waste Management*, 2015, 42, 17-22.
- Mariscal L. G. Tecnologías disponibles para reducir el potencial contaminante de las excretas de granjas porcícolas. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2004, Disponible en línea:  
<http://www.fao.org/3/x6372s08.htm#bm08> (26 de octubre de 2018).
- McAuliffe, G. A.; Takahashi, T.; Mogensen, L.; Hermansen, J. E.; Sage, C. L.; Chapman, D. V.; Lee, M. R. F. Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. *Journal of cleaner production*, 2017, 165, 1163-1173.
- McDougall, F. R.; White, P. R.; Franke, M.; Hindle, P. Integrated solid waste management: a life cycle inventory. John Wiley & Sons. 2008, sd.
- Medina-Herrera, M.; Rodríguez-García, A.; Montoya-Herrera, L.; Cárdenas-Mijangos, J.; Godínez-Mora-Tovar, L.A.; Bustos-Bustos E.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Manríquez-Rocha, J.

- Anaerobic digestion of slaughterhouse solid waste for the optimization of biogas production. *International Journal Environmental Research*, 2014, 8(2), 483-492.
- Menzi, H.; Oenema, O.; Burtun, C. Impacts of intensive livestock production and manure management on the environment. *Livestock in a Changing Landscape: Drivers, Consequences and Responses*; Steinfeld, H.; Mooney, H.; Schneider, F.; Neville, L.E. Eds; USA; 2010; sd.
- Misra, S. S.; Dey, A. Strategies for Mitigation and Adaptation to Climate Change for Sustainable Livestock Production. *Journal of Agriculture and Technology*, 2014, 1(1), 7-19.
- Montejo Olan, S.; Laines Canepa, J. R.; Sosa Oliver, J. A. Co digestión anaerobia de excretas generada en una granja porcina. *Ciencia UANL*, 2016, 19(79), 51-55.
- Niu, M.; Pang, X.; Chen, S. The study of influencing factors to corn straw mixed with pig effluent anaerobic fermentation. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 8, 54-60.
- OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026, Éditions OCDE, París. Disponible en línea: [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2017-es](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-es) 2017; (25 de octubre 2018).
- OIE Organización Mundial de Sanidad Animal. Código Sanitario para los animales terrestres.

Disponible en línea:

[http://www.oie.int/index.php?id=169&L=2&htmlfile=chapitre\\_disposal.htm](http://www.oie.int/index.php?id=169&L=2&htmlfile=chapitre_disposal.htm) 2018; (20 de enero de 2019).

- Pagans, E.; Barrena, R.; Font, X.; Sánchez, A. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere*, 2006, 62(9), 1534-1542.
- Pérez, T.; Pereda, I.; Oliva, D.; Zaiat, M. Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 2016, 50(3), 343-354.
- Pinos-Rodríguez J.M.; García-López J.C.; Peña-Avelino L.Y.; Rendón-Huerta J.A.; González-González C.; Tristán-Patiño F. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 2012, 46 (4), 359-370.
- Priac, A.; Badot, P. M.; Crini, G. Treated wastewater phytotoxicity assessment using *Lactuca sativa*: Focus on germination and root elongation test parameters. *Comptes Rendus Biologies*, 2017, 340(3), 188-194.
- Reckmann, K.; Traulsen, I.; Krieter, J. Environmental impact assessment methodology with special emphasis on European pork



- production. *Journal of Environmental Management*, 2012, 107, 102-109.
- Riaño, B.; García-González, M. C. Greenhouse gas emissions of an on-farm swine manure treatment plant—comparison with conventional storage in anaerobic tanks. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103, 542-548.
- Romero Güiza, M. S.; Mata Alvarez, J.; Chimenos Rivera, J. M.; García, S. A. Nutrient recovery technologies for anaerobic digestion systems: An overview. *Revista Ion*, 2016, 29(1), 7-26.
- Schuchardt, F.; Jiang, T.; Li, G. X.; Huaitalla, R. M. Pig manure systems in Germany and China and the impact on nutrient flow. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 1(6), 858-865.
- Schwarz, M.; Bonhotal, J. Effectiveness of Composting as a Means of Emergency Disposal: A Literature Review. 5th International Symposium on Managing Animal Mortality, Products, by Products and Associated Risks, 2015.
- SAGARPA-SENASICA. Manual de bioseguridad en porcinos. Disponible en línea: [https://www.porcimex.org/MANUAL\\_DE\\_BIOSEGURIDAD\\_EN\\_PORCINOS.pdf](https://www.porcimex.org/MANUAL_DE_BIOSEGURIDAD_EN_PORCINOS.pdf). (15 de enero de 2019).

- SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. DOF: 21 de septiembre de 1998.
- SIAP 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <http://www.siap.gob.mx/poblacion-ganadera/>. (15 de agosto de 2017).
- SIAP 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: [http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance\\_siap\\_gb/pecConcentrado.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecConcentrado.jsp) (31 de octubre 2018)
- Soria, F. M. D. J.; Ferrera-Cerrato, R.; Etchevers, B. J.; Alcántar, G. G.; Trinidad, S. J.; Borges, G. L.; Pereyda, P. G. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamericana*, 2001, 19(4), 353-362.
- Szabová E.; Juriš P.; Papajová I. Sanitation composting process in different seasons. *Ascaris suum* as model. *Waste Management*, 2010, 30 (3), 426-432.
- USDA2017.<https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/81948/ldpm-271-01.pdf?v=0> (1 de noviembre de 2018).

USDA-FAS 2017. Livestock and products semi-annual México. Disponible en línea: <https://www.fas.usda.gov/data/mexico-livestock-and-products-semi-annual-1> (1 de noviembre de 2018).

Venegas, V. J. A.; Espejel, G. A.; Pérez, F. A.; Castellanos, S. J. A.; Sedano, C. G. Potencial de energía eléctrica y factibilidad financiera para biodigestor-motogenerador en granjas porcinas de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2017, 8 (3), 735-740.

Wang, X.; Dadouma, A.; Chen, Y.; Sui, P.; Gao, W.; Jia, L. Sustainability evaluation of the large-scale pig farming system in North China: an emergy analysis based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 102, 144-164.

Wei, S.; Bai, Z. H.; Qin, W.; Xia, L. J.; Oenema, O.; Jiang, R. F.; Ma, L. Environmental, economic and social analysis of peri-urban pig production. *Journal of cleaner production*, 2016, 129, 596-607.

Zeng, J.; Price, G. W.; Arnold, P. Evaluation of an aerobic composting process for the management of Specified Risk Materials (SRM). *Journal of hazardous materials*, 2012, 219, 260-266.

# **GEOGRAFÍA Y PLANEACIÓN URBANA PARA LA SUSTENTABILIDAD**

---





# **SISTEMATIZACIÓN TEÓRICA PARA EL ESTUDIO INTEGRAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS. EL CASO DEL PARQUE OTOMÍ-MEXICA DEL ESTADO DE MÉXICO**

Daniel Villegas Martínez<sup>1</sup>, Jesús Gastón Gutiérrez  
Cedillo<sup>2</sup>, William Gómez Demetrio<sup>3</sup> y Luís Miguel  
Espinosa Rodríguez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). geo\_morf@hotmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). jggc1321@yahoo.com.mx

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).  
wgomezd@uaemex.mx

<sup>4</sup>Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). geo\_luismiguel@hotmail.com

## **1. Introducción**

Nuestro mundo es un conjunto de sistemas y subsistemas complejos, en donde las interrelaciones entre sus componentes determinan las características y comportamiento de los ambientes naturales y antrópicos. Derivado del número de interrelaciones entre los componentes de los ambientes, se determina su complejidad y con ello el enfoque de

estudio que debe utilizarse para tratar de entender y describir su funcionamiento. Algunas teorías clásicas como: la Teoría General de Sistemas, Teoría de los Sistemas Complejos, Teoría del Pensamiento Complejo, entre otras, determinan que el enfoque de estudio multi y transdisciplinario, es adecuado para tratar de entender y describir la realidad (ambientes) desde la mayoría de las perspectivas posible.

Desde esta reflexión científica, se estructura el marco teórico de esta investigación, la cual parte de las consideraciones epistemológicas de las ciencias ambientales (Chiras, 1991), que determinan que el territorio, producto de la construcción política de las sociedades que habitan en nuestro planeta, debe estudiarse desde un enfoque multidisciplinario y sustentarse con fundamentos teóricos de las ciencias ambientales y sociales. Partiendo de estos fundamentos las teorías consideradas en esta investigación son: Teoría de los Sistemas Complejos (García, 2006), Teoría de Ecología Cultural (Steward, 1955) y legislación ambiental mexicana en materia de áreas naturales protegidas (DOF, 2000).

Ante las problemáticas ambientales, derivadas de la prosperidad antrópica y la crisis ambiental<sup>10</sup>,

---

<sup>10</sup> Es una construcción social, en el sentido que es resultado de la instauración y la institucionalización de una racionalidad social de la manera como la racionalidad moderna ha conducido al mundo hacia la insustentabilidad, y no porque sea

los enfoques epistemológicos encaminados hacia el estudio de las ciencias ambientales, la sustentabilidad y el territorio, están en constante reestructuración y evolución dejando atrás los enfoques dualistas que separaban las ciencias ambientales de las ciencias sociales, para enfocarse hacia estudios e investigaciones de tipo multidisciplinarios<sup>11</sup>, que de acuerdo con algunos investigadores e instituciones permiten comprender e interpretar las interrelaciones entre los componentes ambientales y antrópicos de un territorio (Leff, 2011).

La estructura teórica de esta investigación se establece desde la perspectiva holística e integradora propuesta dentro del campo de estudio de la Teoría General de Sistemas (TGS), que en términos generales se presenta como de forma sistémica y como una aproximación y representación de la realidad (mundo). Este paradigma científico es retomado años más tarde para establecer los fundamentos metódicos de las Ciencias

---

una mera narrativa posmoderna que construye realidades virtuales sin un sustento en lo real (Leff, 2011).

<sup>11</sup>De acuerdo con el Instituto Politécnico Nacional los estudios o investigaciones multidisciplinarias, se pueden definir como el esfuerzo de varios investigadores de diferentes disciplinas que trabajan juntos en el desarrollo de un proyecto, aunque pueden tener preguntas separadas los resultados se pueden utilizar para cubrir o logran una meta científica común (IPN, 2017).



Ambientales; ambos aportes científicos consideran que la perspectiva holística e integradora parte del estudio sobre las relaciones que existen entre los componentes que conforman la realidad (grupos humanos y ecosistemas) y de las problemáticas que se derivan de dicha relación, dando paso a una serie de marcos integradores que ofrecen soluciones urgentes ante los problemas ambientales actuales<sup>12</sup> (Bertalanffy, 1968; Arnold y Osorio, 2008; Chiras, 2011).

## **2. Materiales y métodos**

El proceso metodológico de esta investigación comienza con la búsqueda y análisis de información en artículos científicos, libros, capítulos libro sobre la Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1968), Teoría de los Sistemas Complejos (García, 2006), Ecología Cultural (Steward, 1955), Ciencias Ambientales (Chiras, 1991) y la legislación ambiental mexicana en materia de áreas naturales protegidas (2000). La información identificada y seleccionada para dar sustento teórico y jurídico a

---

<sup>12</sup> Algunos problemas prioritarios a nivel mundial son: crisis alimentaria, pérdida de biodiversidad, cambio global, crisis energética, cambio de uso del suelo, desertificación, contaminación ambiental y del agua, entre otros muchos problemas de proporciones globales (UANM-ENES, 2019).

esta investigación de carácter científico, se ordenó y sistematizó en una base de datos (Tabla 1).

Tabla 1. Sistematización teórica y jurídica

<b>Teoría o documento jurídico</b>				
<b>Autor(es)</b>	<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Revista/libro</b>	<b>Enfoque</b>
Ludwig Bertalanffy	General System Theory. Foundations, Development, Applications	1968		Multidisciplinario
Rolando García	Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria	2006	Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.	Interdisciplinario
Julian H. Steward	Teoría de la Ecología Cultural	1955	Theory of culture change.	Multidisciplinario
Daniel Chiras	Environmental science: action for a sustainable future	1991		Multidisciplinario
H. Congreso de la Unión	Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia en áreas naturales protegidas	2008	Diario Oficial de la Federación.	Jurídico

La estructura de la base datos, permitió ordenar de manera cronológica la información recabada y analizada, además de identificar el enfoque con el

que el autor o autores abordan sus procesos de investigación. De esta manera, fue posible seleccionar las teorías y bases jurídicas relacionadas con el objeto de estudio de la presente investigación que obedece a una investigación de tipo mixto, donde el enfoque de análisis es de carácter integral y multidisciplinario.

### **3. Resultados y discusión**

#### *3.1 Sistemas Complejos. Propuesta teórica para el estudio integral de territorios bajo protección ambiental*

De acuerdo con autores como Villatoro (2017), Reale y Antiseri (2007) y Cappelletti (1984), el enfoque sistémico tiene sus inicios en la Grecia antigua, en concreto en el pensamiento pluralista de Empédocles y Anaxágoras. El pluralismo se puede definir como la totalidad (mundo) que está compuesto de realidades independientes las unas de las otras, o bien interrelacionadas. De acuerdo con Empédocles todas las entidades de nuestro planeta están compuestas por cuatro elementos básicos (agua, aire, fuego y tierra), posteriormente esta teoría es retomada por Demócrito quien añade que

los cuatro elementos básicos están formados por átomos (Villatoro, 2017).

No obstante, además de la cultura griega en algunas culturas como la hindú y la china, se tienen registros de principio teóricos similares como el Karma y el Yin-Yan respectivamente, pensamientos que establecen una relación causa, efecto y balance (Villatoro, 2017). Sin embargo, el pensamiento de sistemas tal cual se conoce hoy en día tiene sus orígenes a mediados del siglo XX, en el pensamiento del biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), quien propuso por primera vez la denominada Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1950). Para él, la Teoría General de Sistemas (TGS) debe percibirse como un mecanismo de integración entre las ciencias ambientales y sociales, y al mismo tiempo ser un instrumento metodológico básico para la preparación de científicos (Arnold y Osorio, 2008).

De acuerdo con Arnold y Osorio (2008), la TGS se acuñó bajo los siguientes argumentos: a) investigar conceptos, leyes y modelos desde diferentes campos y facilitar sus trascendencias entre ellos; b) Desarrollar modelos teóricos en los campos de estudio que carecen de ellos; c) evitar la duplicidad de propuestas teóricas y d) promover la unidad de las ciencias a través de principios conceptuales y metodológicos unificadores. Sin

embargo, durante la segunda mitad del siglo XX, diversos investigadores incorporan a la TGS aportes conceptuales desde diferentes disciplinas, motivo por el cual deja de relacionar a la TGS exclusivamente desde el pensamiento de Bertalanffy, y se entiende actualmente como un pensamiento multidisciplinario de investigación científica.

En la actualidad la construcción multidisciplinaria de la TGS comprende un conjunto de enfoques teóricos entre los cuales se puede destacar la: Teoría de Conjuntos de Mesarovic (1964); Teoría de Redes de Rapoport (1957); Teoría Cibernética de Wiener (1948); Teoría de los Juegos de Von Neumann (1932) entre muchas otras. De esta manera, la aplicación de la TGS en la práctica debe ser diligente de acuerdo con la naturaleza del caso, los criterios operacionales, el orden jerárquico en los sistemas naturales, socioculturales e incluso en los materiales. Esta complejidad en el campo de aplicaciones de la TGS no reconoce limitaciones al usarla en el análisis de sistemas naturales (organismos vivos) y sistemas artificiales (maquinas). Décadas más tarde bajo la percepción multidisciplinaria surge la Teoría de los Sistemas Complejos (TSC), desarrollada por García (1981, 2000 y 2006). De acuerdo con Rodríguez (2014) la TSC constituye un enfoque teórico-metodológico único y original que se distingue de otras propuestas

que se basan en torno a la complejidad como: el pensamiento complejo de Morin (1980); las ciencias de la complejidad de Miller y Page (2007) y la complejidad ambiental de Leff (2011).

La característica distintiva de la TSC propuesta por García (2006), se define en la articulación sistémica y explícita (interrelaciones) entre los componentes de los sistemas. Esta característica se puede vislumbrar bajo cuatro dimensiones: a) propone una metodología operativa desde el punto de vista empírico e interdisciplinario; b) se fundamenta desde las bases epistémicas del marco conceptual del constructivismo; y c) es una herramienta para el diagnóstico integrado de sistemas complejos que permitan actuar sobre el sistema para transformarlo (Rodríguez, 2014).

De acuerdo con García (2006), un sistema complejo se puede definir como aquel sistema cuyos elementos son heterogéneos en el dominio que pertenecen a distintas disciplinas, pero los elementos que lo conforman interactúan entre sí, de tal manera que son interdefinibles. La interdefinibilidad es la principal característica de un sistema complejo, ya que, los componentes (naturales o socioculturales) que conforman un territorio, no se pueden estudiar de manera aislada, ya que, la modificación de alguno de ellos actúa como una cadena

que va repercutiendo en el funcionamiento de todo el sistema.

Bajo esta perspectiva de análisis, para determinar el estado actual de un territorio y sus componentes, es de vital importancia considerar algunas características como: ubicación geográfica y delimitación del territorio que se va a analizar. Desde el enfoque geográfico integral, esta actividad se puede realizar bajo los principios teóricos de la geografía (localización, explicación, relación, comparación y evolución), dentro de las ciencias geográficas estos principios son normas que permiten realizar una investigación eficiente sobre hechos y fenómenos que se desarrollan dentro de la esfera geográfica (Ratzel, 1909; La-Blanche, 1922; Humboldt *et al.*, 1874; Brunhes, 1910).

Al analizar un territorio como un sistema, es importante definir la escala de análisis, ya que, ésta puede ser considerada desde la totalidad de la Tierra, hasta el análisis de un sitio (localidad). Esta visión de carácter espacial brinda la posibilidad de estudiar la realidad como un todo y de allí como un sistema, es una cuestión fundamental cuando se buscan soluciones concretas y pertinentes desde un enfoque espacial. En este sentido la TSC, busca analizar la realidad desde dos aspectos, uno al abordar la estructura de la realidad como base empírica, y dos

al brindar claridad al proceso de construcción del conocimiento epistemológico (García, 2000 y 2006). Es claro que las bases de la TSC, puede ser aplicada desde ambas perspectivas, por un lado se busca analizar y describir la estructura actual de los territorios como un sistema complejo, ya que estos se encuentra inmerso en un ambiente donde la interacción entre sus componentes pueden afectar su rendimiento y funcionamiento, y por el otro, se busca contribuir al conocimiento científico, a través de la formulación e instrumentación de aproximaciones teóricas y metodológicas a partir de los datos que nos proporciona la realidad (lo observable como datos) que pueden ser interpretados por el observador (investigador) y los hechos como el origen de lo observable (Buzai, 2014).

Lo que resulta importante de esta perspectiva, es como se aborda la realidad, como una estructura que pertenece a una totalidad seccionada del medio (sistema), es decir, una realidad formada por niveles de organización semiautónomos (subsistemas), que tienen una organización jerárquica y funciones específicas además de interactuar entre sí (García, 2006). A partir de las interrelaciones que existen entre los componentes ambientales y sociales de un territorio se cumplen una serie de funciones (regulación, sustrato, producción e información) y servicios ambientales (regulación, alimentos,



recreación e investigación) que permiten el desarrollo social de las poblaciones inmersas en los ambientes y de aquéllas que se encuentran ubicadas en territorios adyacentes; de allí la importancia de estudiar las interrelaciones que existen entre los componentes de un territorio (Buzai, 2014).

### *3.2 Ecología Cultural. Adaptaciones socioculturales en territorios bajo protección ambiental*

La ecología cultural es una orientación teórico-metodológica que surge dentro de los estudios y teorías antropológicas durante la década de los años cincuenta bajo la corriente filosófica del Neoevolucionismo y cuyo fundador es Steward (1955); quien evolucionó el pensamiento sobre las adaptaciones sociales al medio natural, y es así como propone una serie metodológica encargada de investigar los cambios sociales sobre las adaptaciones, mediante los procesos tecnológicos y culturales (Ruiz y Castañeda, 2007).

Desde el enfoque teórico de la ecología cultural, se intenta explicar a partir de una serie de principios, metodologías y conceptos que pueden ser aplicados en diferentes contextos espaciales y temporales, como una sociedad puede adaptarse socio-culturalmente a su ambiente (entorno), considerando siempre a la cultura como el elemento decisivo que

permite a las sociedades saber cómo enfrentar y ajustarse ante las manifestaciones emitidas por los componentes de un ecosistema (Steward, 1955).

Bajo esta perspectiva se puede conceptualizar a la ecología cultural, como una teoría que estudia y explica las relaciones del hombre con su ambiente biótico a través de niveles de integración, que va desde local (comunidad) a lo regional, nacional e incluso internacional (Juan, 2006). Esta teoría establece que los patrones de comportamiento cultural permiten la adaptación del ser humano a su medio mediante una serie de interacciones dinámicas, para el caso de los territorios bajo protección ambiental (Áreas Naturales Protegidas [ANP]) el nivel de integración que se tiene que utilizar es de acuerdo con su extensión territorial, ya que, hay algunas ANP que abarcan solo una parte de una localidad y otras que pueden extenderse por varios estados de la República Mexicana.

De acuerdo con Juan (2006), la ecología cultural centra sus aportes principalmente en las reacciones y respuestas emitidas por los seres humanos a través de lo que se conoce como cultura, la cual les permite comprender y explicar los procesos de cambio social y las adaptaciones a su entorno natural. Para comprender estas adaptaciones socioculturales es necesario establecer niveles de relación entre las sociedades que se encuentran establecidas dentro de

los límites administrativos de las ANP; algunas de ellas pueden ser:

- a) Relación entre los asentamientos humanos y los componentes biofísicos del territorio (latitud, longitud, altitud, topografía, clima, suelo, agua y vegetación).
- b) Relación entre comunidad, flora y fauna que componen los ecosistemas que rodean los asentamientos humanos.
- c) Interrelación entre personas de distintas comunidades (relaciones laborales, comerciales, familiares, religiosas y sociales).
- d) Relación hombre tecnología (el desarrollo tecnológico adaptado a las condiciones del ambiente).

Estas relaciones permiten que las sociedades puedan adaptarse a las condiciones ambientales de las ANP, como señala Steward, el hombre posee capacidades para relacionarse y adaptarse a su entorno natural a través de su acervo cultural, el cual se va enriqueciendo y transmitiendo de generación en generación a través de la observación, la práctica, la experiencia (conocimientos empíricos) y las necesidades que van surgiendo conforme se van modificando las cuestiones familiares, económicas, culturales, políticas y ambientales (situación actual

del territorio) (Steward, 1955; Juan, 2006; Villegas 2016).

La ecología cultural como conceptualización teórica y herramienta metodológica ayuda a involucrarse en el estudio de los componentes naturales que proveen los ecosistemas de las ANP, ya que estos son el sustento ambiental, económico, cultural, alimentario y de ocio para los grupos humanos que habitan en estos ambientes; además de favorecer un enfoque interdisciplinario para comprender las bases ambientales, sociales y culturales que hacen posible el aprovechamiento de los componentes naturales por las familias que integran las sociedades actuales.

Desde otra dimensión, la ecología cultural se enfoca en la evolución de las culturas, Duran (1987) hace mención que la evolución de las culturales en territorios con características similares se desarrolla en función de las condiciones similares (paralelismo) entre cada comunidad, o cuando los rasgos culturales son similares, por otro lado, las causas que provocan las semejanzas y diferencias en el proceso evolutivo de los sistemas socioculturales (Harris, 1996). Desde esta perspectiva Ellen (1989), establece la posibilidad de ver al ambiente como una variable clave en la evolución de las sociedades al enfocarse en las similitudes de su contexto geográfico donde se desarrollan.

Pérez (2002), en su libro *Antropología y complejidad*, enmarca a la ecología cultural como el medio bajo el cual se puede analizar los aspectos culturales de una sociedad y la vida del hombre, considerando al medio como el elemento base en el desarrollo de las sociedades. Esta postura metodológica combina el análisis de los aspectos físicos del entorno natural y la producción cultural de las sociedades, de acuerdo con los términos de Steward, son estas relaciones las que dan origen a las llamadas áreas culturales, definidas como “la construcción de uniformidades y comportamientos que se dan en un área de similitudes ambientales” y donde los procesos particulares son representados por culturas de otras partes del mundo (Steward, 1993; Ruiz y Castañeda, 2007).

Con base a lo anterior, se puede definir a la ecología cultural como el estudio de las sociedades humanas adaptadas a las condiciones naturales del territorio a través de su acervo cultural (Marzal, 1997). En México, es común encontrar dentro de los límites administrativos de las ANP, asentamientos humanos urbanos o rurales, e incluso en algunas de ellas, se han documentado establecimientos de industrias en operación, minas de extracción de recursos pétreos y desarrollo de infraestructura turística, de investigación y vías de comunicación

que se contraponen en algunas ocasiones a los objetivos de decreto de las ANP (Villegas, 2019).

### *3.3 Ciencias Ambientales. Un dilema sobre la percepción y estudio del ambiente*

El desarrollo epistemológico de las ciencias ambientales reconoce la necesidad, centralidad y legitimidad de un enfoque de estudio orientado a resolver dilemas o reflexionar sobre ideas constitutivas de nuestro pensamiento y los enfoques de las matrices multidisciplinares. De acuerdo con Morales (2017) los cimientos de la epistemología ambiental comenzaron a ser delineados desde el momento mismo que se consideró a lo ambiental como problema; sin embargo, la ausencia epistemológica sobre lo ambiental se relaciona estrechamente con los cambios que ha sufrido el concepto ambiente, dentro de las diferentes disciplinas del conocimiento científico.

Por ejemplo, en la biología y ecología, el ambiente se define como las condiciones bióticas y abióticas de un organismo, población o comunidad; en las ingenierías y en la química se define como los componentes abióticos de los ambientes; en las humanidades y ciencias sociales se percibe como las condiciones externas de un fenómeno; en derecho se define como las interrelaciones entre subsistemas

naturales, económicos o políticos; en economía indica medios de extracción, producción y generación de capital. Además, en otras disciplinas, e incluso entre las ya mencionadas también se concibe el ambiente como naturaleza o ecosistema (Morales, 2017).

Dentro del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de México, el ambiente se percibe como una serie de problemáticas asociadas con el ambiente, en cual su objetivo principal es la generación de conocimientos y el planteamiento de alternativas y soluciones ante dichos paradigmas, mediante equipos interdisciplinarios interesados en estudiar, bajo el enfoque holístico de la ciencia, los procesos ambientales (UAEMex, 2016).

Para el programa de Maestría en Ciencias Ambientales de la Universidad del Mar, se concibe al ambiente como una serie de problemas ambientales, en el cual el objetivo general del plan de estudio es, formar especialistas con compromiso ético y profesional hacia la comunidad, que generen alternativas de prevención y/o solución de problemas ambientales, a través de un sistema orientado hacia la investigación, con alto nivel de competencia en el ámbito nacional (UMAR, 2019).

En la licenciatura en Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional Autónoma de México, se

percibe al ambiente desde una serie de problemas ambientales, en la cual su principal objetivo es formar recursos humanos en el estudio y solución de problemas ambientales, así como en el manejo integral del paisaje y de los ecosistemas, bajo un enfoque interdisciplinario, con bases sólidas en Ciencias Naturales que combinan conocimientos teóricos e instrumentales (técnicas, métodos, instrumental y de equipo), con las habilidades, destrezas, aptitudes y actitudes para identificar, analizar y resolver problemas ambientales relacionados con el manejo de ecosistemas y del paisaje (UNAM, 2019).

Así que el término ciencias ambientales, puede responder a acepciones desiguales de acuerdo con la diferente información o formación que se tienen en las distintas disciplinas y universidades de México. Sin embargo, es importante mencionar que ante esta dispersa forma de concebir a las ciencias ambientales y al ambiente, se crean una seria de conflictos al tratar de confrontar los objetivos de estudio mediante un contexto de mayor alcance como la multi e interdisciplinaria en ámbitos de investigación y docencia (Morales y Rojas, 2015).

En el acontecer científico y las escuelas del pensamiento crítico, existen diversos pensamientos sobre como concebir el ambiente. Desde los pensamientos éticos ecocentristas, que rebajan a la



humanidad y centran a la naturaleza mediante un sistema de valores desde la filosofía política ecológica, como el principal eje de estudio. En disyuntiva los antropocentristas, demeritan a la naturaleza y desde el plano de la epistemología, sitúa al ser humano como medida y centro de todas las cosas. Resultado de los discursos críticos entre ambos pensamientos surge el ambiocentrismo, que no se refiere a un sujeto y/o a un objeto superior, inferior o en igualdad, sino que nos permite comprender la relación entre lo humano y lo no humano como una relación de interdependencia (Morales y Rojas, 2015).

Esta última postura epistemológica concibe lo humano desde el ambiente, rompiendo con ello el dilema dualista sobre el ambiente, convirtiéndolo en una relación inteligible en sistemas que religa “todo con todo”, definiendo ambiente como la totalidad resultante de la relación sistemas-ambiente (Nava, 2012; Morales, 2017). Desde estas perspectivas epistemológicas se derivan las relaciones entre los sistemas generados por sistemas y subsistemas, y las interrelaciones entre sus componentes presentes dentro de los territorios bajo protección ambiental.

De las relaciones entre los sistemas ambientales y los sistemas antrópicos que convergen dentro de los territorios establecidos política y socialmente como áreas naturales protegidas (ANP), de derivan

un serie de interrelaciones entre sus componentes, ordenados y sistematizados jerárquicamente, sin embargo, al analizarlos desde un punto de vista crítico, se determina que su asociación deriva en una serie de relaciones de igual importancia, sin interesar la jerarquía y ubicación dentro del sistema o subsistema. Lo que resultaría menester separar el ambiente natural del ambiente social, ya que, el ambiente-afuera, ambiente natural y ambiente humano han ayudado a formar la concepción sistémica de ambiente, todo en relación con un todo (Morales, 2017).

### *3.4 Legislación Ambiental Mexicana. Un acercamiento a la estructura jurídica de las áreas naturales protegidas en México*

La legislación ambiental mexicana, está constituida a partir de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y de una serie de leyes ambientales que buscan, garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar (SEMARNAT, 2019). Dentro de la estructura de dicha Constitución en el artículo 4º, párrafo cuarto se establece que todos los ciudadanos tienen derecho a un desarrollo y bienestar en ambiente sano, en el cual el Estado garantizará el respeto a este derecho, y el daño y

deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley (DOF, 2019).

De acuerdo con la Secretaría de Gobernación (SEGOB) y la Unidad General de Asuntos Jurídicos las leyes reglamentarias están constituidas a partir de los artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Una ley se puede definir como un precepto o conjunto de preceptos, dictados por la autoridad, mediante el cual se manda o prohíbe algo acordado por los órganos legislativos competentes, entendiendo que dichos órganos son la expresión de la voluntad popular representada por el Parlamento o Poder Legislativo.

En la Tabla 2, se presenta las principales y vigentes leyes reglamentarias relacionadas con el ambiente y el artículo constitucional del cual se desprenden.

Tabla 2. Legislación ambiental mexicana, leyes vigentes.

Ley reglamentaria de la Constitución	Fundamento constitucional
Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	Artículo 4
Ley de Aguas Nacionales	Artículo 27
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable	Artículo 27
Ley General de Vida Silvestre	Artículo 27, párrafo tercero y 73, fracción XXIX-G

	constitucionales
Ley de Desarrollo Rural Sustentable	Artículo 27, fracción XX constitucional
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos	
Ley de Productos Orgánicos	
Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables	Artículos 27 y 73, fracción XXIX-L constitucional
Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos	Artículos 25 y 27, fracción XX constitucional
Ley Federal del Mar	Artículo 27, párrafos cuarto, quinto, sexto y octavo constitucional

Bolio (2013), expresa que cuando se analiza al ambiente desde el punto de vista jurídico, este debe orientarse al ecosistema, más que al ser humano. Sin embargo, desde el punto de vista holístico, un ecosistema no significa solo factores físicos, también existe un complejo entramado de interrelaciones con factores sociales, económicos, políticos y culturales, desde esta perspectiva concebir un ecosistema nos conlleva acuñar un concepto jurídico integral del ambiente, en donde el resultado es el análisis y descripción de las interrelaciones entre los componentes ambientales y socioculturales.

Desde este punto de vista se formula la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual establece desde un punto de vista integral la trascendencia de la participación social en las problemáticas ambientales

de México. Desde un punto de vista concreto la LGEEPA, establece los presupuestos mínimos para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

La LGEEPA fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 28 de enero de 1988, bajo el respaldo del artículo 4o de la Constitución Política de los Estado de Unidos Mexicanos, en la cual se establece “garantizar el derecho de toda persona a un medio ambiente adecuado, para su desarrollo y bienestar” (DOF, 2018). Desde esa fecha la LGEEPA, ha sufrido una serie de modificaciones, por lo que se podría considerar relativamente joven la legislación ambiental mexicana. Sin embargo, cada vez toma más fuerza debido a que el cuidado del ambiente se ha convertido en una necesidad prioritaria de la nación y el mundo.

La noción de desarrollo socioenómico tiende a construir un futuro inédito, ante una creciente crisis socioambiental que vive nuestro país, existe una desaparición del desarrollo, resultado de una creciente devastación ambiental, el aumento de la pobreza, la ignorancia, la segregación social, la falta de recursos, la polarización, la existencia de un Estado de desarrollo social y un Estado de Derecho. En respuesta a esta crisis ambiental compleja, la

LGEEPA está compuesta de siete reglamentos expedidos por el presidente de la república mexicana, es su carácter de titular del ejecutivo federal, que tratan de regular los sectores ambientales más vulnerables de nuestro país. Estos reglamentos son:

- a) Reglamento en materia de evaluación ambiental.
- b) Reglamento en materia de residuos peligrosos.
- c) Reglamento en materia de prevención y control de la contaminación de la atmosfera.
- d) Reglamento para la protección del ambiente contra la contaminación originada por la emisión del ruido.
- e) Reglamento en materia de auditoría ambiental.
- f) Reglamento en materia de ordenamiento ecológico.
- g) Reglamento en materia de áreas naturales protegidas.

Durante la administración del Dr. Ernesto Zedillo Ponce de León, mediante la entonces Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) hoy Secretaria de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se publica en el Diario Oficial de la Federación el día jueves 30 de noviembre de 2000, el REGLAMENTO de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de

Áreas Naturales Protegidas (REG-LGEEPA-ANP), que se desprende del artículo 1º, apartado IV de la LGEEPA, que establece que “La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas” (DOF, 2014). El REG-LGEEPA-ANP, está compuesto por ocho títulos, 27 capítulos y 144 artículos en los cuales se establece lo relativo al establecimiento, administración y manejo de las áreas naturales protegidas de competencia de la Federación. Actualmente en México existe un total de 182 ANP de carácter federal, divididas en seis categorías: a) Reservas de la Biosfera; b) Parques Nacionales; c) Monumentos Naturales; d) Áreas de Protección de Recursos Naturales; y e) Áreas de Protección de Fauna y Flora Santuarios, administradas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas –CONANP– (CONABIO, 2019).

Sin embargo, también existen ANP de carácter estatal, en el Estado de México actualmente existe un total de 97 ANP, de las cuales 83 son administradas por la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF) y clasificadas en: a) Parques Estatales; b) Reservas Ecológicas Estatales; c) Parque Municipales; d) Parques Urbanos y e) Parque sin decreto. No obstante, también existen 14 ANP de carácter federal ubicadas

dentro del territorio mexiquense, pero estas son administradas por la CONANP bajo el REG-LGEEPA-ANP.

Las 83 ANP de carácter estatal, tienen sus bases jurídicas en el Libro Segundo: Del Equilibrio Ecológico, la Protección al Ambiente y Fomento al Desarrollo Sostenible, establecido en el Código para la Biodiversidad del Estado de México. El cual fue publicado en la Gaceta del Estado de México el día 13 de mayo de 2005, durante la administración del Lic. Enrique Peña Nieto. En el Libro Segundo, se aborda de manera específica la creación, regulación, vigilancia y administración de las áreas naturales protegidas que el presente Código prevé con la participación de las autoridades municipales correspondientes (GEM, 2005).

No obstante, de acuerdo a los criterios jurídicos del REG-LGEEPA-ANP y el Código para la Biodiversidad, cada ANP debe tener su propio programa de manejo, el cual es un documento que funge como el instrumento rector de planeación y regulación que establece las actividades, acciones y lineamientos básicos para el manejo y la administración del área natural protegida respectiva (DOF, 2014; GEM, 2005).



### *3.5 Propuesta de sistematización teórica para el estudio integral de las áreas naturales protegidas. El caso del Parque Otomí-Mexica del Estado de México*

Durante el año 2017, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) celebró los 100 años de la conservación de la naturaleza a través de Áreas Naturales Protegidas (ANP). Fue el 27 de noviembre de 1917 cuando el presidente Venustiano Carranza decretó la primer Área Natural Protegida de México: El Parque Nacional Desierto de los Leones, ubicado al suroeste de la Ciudad de México en las delegaciones Cuajimalpa y Álvaro Obregón, que abarca una superficie de 1,529 hectáreas de bosque de pino (CONANP, 2017).

La declaratoria e instrumentación de ANP en México, se deriva de una serie de políticas ambientales enfocadas hacia la conservación de espacios naturales con gran relevancia socioambiental. Actualmente, este esquema de conservación comprende una superficie total de 90, 839, 521 hectáreas distribuidas en 182 ANP de carácter federal en cuyos ecosistemas que las conforman desempeñan un rol de suma importancia en la vida y la economía de quienes habitan en ellas; además de poseer especies únicas de flora y fauna en el planeta (CONANP, 2017).

Algunas de las estrategias instrumentadas por el gobierno federal mediante la CONANP, ha sido la implementación de proyectos técnicos en cooperación con socios internacionales que apoyan a productores dentro de las ANP, generando diversos productos bajo estrictas prácticas de sustentabilidad que son exportados a diversos países del mundo (CONANP, 2017). Sin embargo, ante este evidente desarrollo en la instrumentación de estrategias técnicas enfocadas hacia el desarrollo y administración sustentable de los territorios bajo protección ambiental, existe un evidente rezago epistemológico, teórico y metodológico sobre el estudio de ANP en México, generado por la creciente y diversas formas de concebir y estudiar estos espacios socioculturales.

Desde las diferentes perspectivas socio-culturales y modelos de desarrollo, las ANP son concebidas bajo diferentes pensamientos, por ejemplo, desde las perspectivas de los gobiernos y organizaciones no gubernamentales, son porciones del territorio (terrestre o acuático) cuyo fin es conservar la biodiversidad representativa de los ecosistemas para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos y cuyas características no han sido esencialmente modificadas (SEMARNAT, 2019). Desde la mercantilización de la naturaleza Leff (2000) define

este proceso como capitalización de la naturaleza, en cual el sistema capitalista y neoliberal asigna un valor económico en el mercado para los componentes de la biodiversidad.

De acuerdo con Cruz *et al.* (2018) el neoliberalismo supone el bienestar humano y el impulso a la capacidad emprendedora de los individuos en el mercado, desde este enfoque los asentamientos humanos que se desarrollan al interior de las ANP, han materializado de formar distintas los ambientes que constituyen estos espacios de protección, situando las perspectivas desde procesos de destrucción y degradación ambiental, hasta procesos de construcción y reconstrucción de nuevos discursos y nuevos mundos culturales, políticos y económicos. Sin embargo, son pocos los puntos de vista socioculturales que reconocen la importancia socioambiental de las ANP, y las correlaciones que existe entre estos espacios y el resto del territorio nacional y mundial.

La influencia de las diferentes doctrinas del pensamiento filosófico, oscilan entre polos opuestos, estas variaciones se construyen en el discurso epistemológico de la dicotomía clásica entre hombre y naturaleza, pero también del antiguo debate filosófico entre monismo y dualismo, entre holismo y reduccionismo (Morales, 2017). Desde el surgimiento de la complejidad y un poco más

reciente desde la propuesta del pensamiento complejo, se ha replanteado el discurso sobre la representación y análisis de la realidad, sobre la manera de ver el mundo que construye sentidos de relaciones, entre sistemas y subsistemas, entre sus componentes internos y externos, y entre sus correlaciones que dan paso a la generación y desarrollo de nuevos sistemas y subsistemas, plenamente relacionados y jerarquizados (Morales, 2017; Cruz *et al.*, 2018).

Desde el planteamiento filosófico de sistemas (Bertalanffy, 1968), la complejidad (Morin, 1980; García, 2006), las relaciones entre ambiente y cultural (Steward, 1995) y el marco jurídico ambiental establecido para ANP (DOF, 2014). Se puede determinar que los territorios decretados como ANP, son una serie de sistemas conformados por subsistemas organizados y jerarquizados, dentro de los cuales existen una serie de elementos biofísicos y socioculturales interrelacionados entre sí, y administrados bajo una serie de políticas de manejo (aprovechamiento, conservación, protección y restauración) propuestas desde el marco jurídico de la legislación ambiental mexicana (LGEEPA, 2018).

Derivado de las relaciones teóricas y jurídicas, se propone la sistematización teórico - jurídico para el estudio y análisis integral de ANP (Figura 1).

Como se puede observar, la estructura de la sistematización, muestra las interrelaciones que existen entre los componentes<sup>13</sup> biofísicos, a los cuales vamos a considerar como: ubicación, relieve, geología, clima, edafología, hidrología y usos del suelo y vegetación (subsistema ambiental) y los componentes socioculturales, a los que definimos como: asentamientos humanos, acervo cultural, actividades económicas, políticas y administrativas (subsistema antrópico) que convergen dentro de los territorios decretados como ANP, a partir de estas interrelaciones se determinan las consideraciones jurídicas (subsistema administrativo) bajo las cuales se gestionaran los territorios decretados como ANP.

---

<sup>13</sup> Derivado de una investigación integral dentro del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, se seleccionaron los componentes del territorio que se ejemplifican en la presente investigación, sin embargo, se debe considerar que existen más componentes que interactúan dentro de los territorios decretados como ANP.

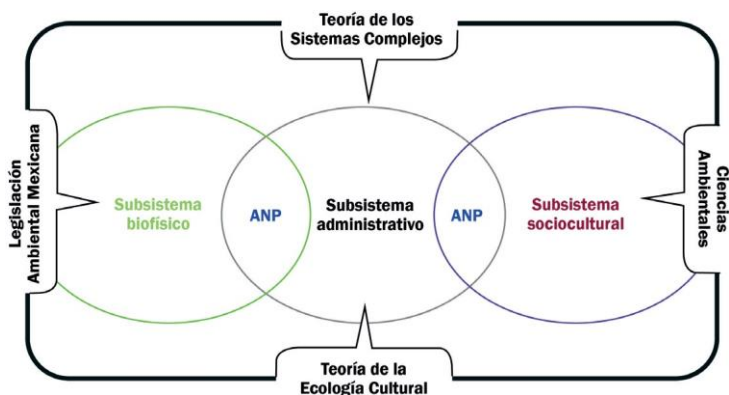


Figura 1. Sistematización teórico-jurídica para el estudio y análisis integral de áreas naturales protegidas

Del análisis territorial y administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, emerger la perspectiva de carácter holística para el análisis integral de los fundamentos teóricos propuestos dentro del pensamiento sistémico y de la ecología cultural, de las propuestas metodológicas ambiguas establecidas dentro del marco de las ciencias ambientales y de las políticas de manejo decretadas por la legislación ambiental mexicana. Para retomar las bases del enfoque holístico, es necesario pensar al territorio del parque como un sistema complejo<sup>14</sup>, formado de sistemas y subsistemas que

<sup>14</sup> Un sistema es una interrelación de elementos que constituyen una entidad global o unidad global. Tal definición comportados caracteres principales: el primero es la interrelación de los elementos y el segundo es la unidad global constituida por

dan origen a otros sistemas y subsistemas, y estos a su vez, se relacionan con otros macro y microsistemas, mediante la interrelación de sus componentes que se desarrollan de manera natural, antrópica y jurídica.

Para el caso del territorio administrativo del Parque Otomí-Mexica del Estado de México, las correlaciones que existen entre los componentes biofísicos que componen el subsistema ambiental del parque, han generado las condiciones necesarias para el establecimiento y desarrollo de asentamiento humanos, componente esencial que permite la conformación del subsistema sociocultural del ANP. Las relaciones históricas entre los componentes del subsistema ambiental y sociocultural en el espacio geográfico de estudio dieron inicio hace aproximadamente unos 30 mil años, con el asentamiento del pueblo otomí en los territorios que hoy conforman los municipios de Villa del Carbón, Isidro Fabela, Jilotzingo, Lerma y Ocoyoacac (Juan *et al.*, 2017).

De acuerdo con datos históricos e historias de vida, en aquellos días las relaciones entre subsistemas (ambiental y sociocultural) estaban enfocadas hacia una relación profunda (sagrada), con la naturaleza y el cosmos, relación que aún

---

estos elementos en interacción (Morin, 1993 y Barberousse, 2008).

podemos apreciar en algunos habitantes que conforman localidades en los municipios de Temoaya y Lerma (San Francisco Xochicuautila). Sin embargo, durante la década de 1940 se da inicio a un acelerado proceso de urbanización e industrialización en el Estado de México y resto del país; la construcción del corredor industrial Lerma-Toluca y la ampliación y modernización de la autopista México-Toluca, reconfiguran nuevamente las interrelaciones entre los componentes de los subsistemas del parque (Barrientos, 2004).

A inicio de la década de 1980, esta reconfiguración y complejas series de interrelaciones que emergen entre los subsistemas del parque, detonan las bases necesarias para la instrumentación de un subsistema de carácter jurídico, fundamentado principalmente en la conservación de los territorios con gran relevancia ecosistémica. Este fundamento jurídico se detona como parte de una estrategia de protección al ambiente, generada de las crecientes problemáticas de orden planetario, tales como el cambio climático global, la pérdida de biodiversidad, la reducción de la capa de ozono, la deforestación y desertificación de grandes áreas, y de problemáticas de orden local como: contaminación del aire, del agua y del suelo, la degradación de ecosistemas, la pérdida de componentes naturales, los desastres de origen no



antrópico y, en general, el deterioro de las condiciones de vida de la población determinadas por su medio biofísico inmediato (GEM, 1980).

Bajo esta serie de problemáticas y estrategias de protección ambiental, durante el año 1980 se decreta como Área Natural Protegida Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa denominado Parque Otomí-Mexica del Estado de México. Dando inicio a una serie de interrelaciones entre componentes ambientales, socioculturales y jurídicos, que a su vez detonan la creación de un sistema aún más complejo, en donde el creciente número de interrelaciones entre los componentes territoriales aumenta y se reconfiguran paulatinamente, no solo por las interrelaciones internas, si no, también por el complejo número de interrelaciones externas que generan innumerables presiones ambientales, socioculturales y jurídicas sobre el territorio administrativo del ANP.

Del entramado ambiental-sociocultural-jurídico que presentan los territorios decretados como ANP, a los cuales, se puede considerar como una serie de sistemas complejos, capaces de relacionarse con otros territorios constituidos bajo diferentes contextos geográficos y administrativos, creando con ello un infinito número de interrelaciones entre sus componentes. Se deriva una estructura compleja, con la cual se puede argumentar que los

fundamentos teóricos para el estudio de las ANP deben ser de carácter holístico e integral entre las ciencias ambientales, sociales y jurídicas, capaces de comprender desde su propio objeto de estudio que estos espacios, son un conjunto de sistemas y subsistemas capaces de interrelacionar sus componentes naturales, sociales, económicos, culturales y jurídicos.

Derivado de este análisis, teórico, jurídico y empírico, la sistematización teórica propuesta en esta investigación centra a la teoría de los sistemas complejos, como el eje de anclaje entre la ecología cultural, las ciencias ambientales y las normas jurídicas que rigen la administración del territorio Otomí-Mexica. Bajo este anclaje teórico, se prende que el diseño e instrumentación de estrategias orientadas hacia el manejo socioambiental de los componentes territoriales del parque, sean de carácter integral, capaces de comprender el mayor número de variables, desde el mayor número de realidades posibles.

### *3.6 Área de Estudio*

El Área Natural Protegida Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa, que se denominara Parque Otomí Mexica del Estado de México, se encuentra ubicado geográficamente en la

zona centro del Eje Neovolcánico Transversal de México, tiene una longitud aproximada de 85 kilómetros arriba de la cota de 2800 msnm, territorio formado principalmente por una cadena montañosa, que comprende desde el Macizo de Zempoala, la Sierra de Ocuilan, Xalatlaco, estribaciones del Ajusto, Sierra de las Cruces, Sierra de Monte Alto, hasta la Sierra de la Bufa.

El Parque Otomí comprende un área aproximada de 105, 875 hectáreas, distribuidas espacialmente en 16 municipios del Estado de México: Huixquilucan, Isidro Fabela, Jilotzingo, Jiquipilco, Lerma, Naucalpan, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Ocuilan, Oztolotepec, Morelos, Temoaya, Tianguistenco, Villa del Carbón, Xalatlaco y Xonacatlán. Sus coordenadas geográficas extremas son: 18° 59' 59.57'' - 19° 45' 19.34'' de latitud norte y 99° 20' 21.75'' - 99° 32' 01.41'' de longitud oeste, Figura 2 (Villegas, 2019).

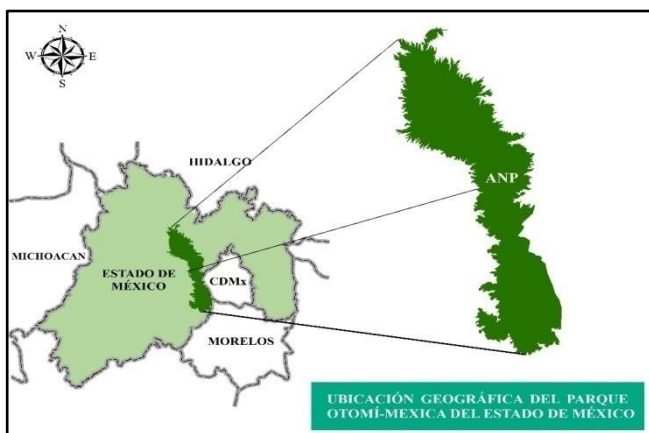


Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

#### 4. Conclusiones

Las diferentes doctrinas del pensamiento científico y filosófico han construido un armazón de fundamentos teóricos, modelos y métodos para tratar de analizar y comprender el funcionamiento de nuestro mundo. Desde el antiguo debate filosófico entre monismo y dualismo, entre holismo y reduccionismo, se han reestructurado una y otra vez, los debates y enfoques científicos sobre el estudio de nuestra realidad, llegando a un punto, en donde la complejidad del pensamiento teórico es necesario para tratar de entender el desarrollo y funcionamiento de los sistemas y subsistemas que

conforman el entramado de la vida. Ante la globalización y degradación ambiental de nuestro planeta, se obtienen los fundamentos necesarios para tratar de generar nuevos pensamientos sobre el análisis y generación de estrategias que permitan la continuidad de los procesos socioambientales dentro de la esfera geográfica.

La asociación de los fundamentos teóricos y jurídicos analizados y sistematizados durante el desarrollo de esta investigación, han proporcionado un enfoque robusto sobre el abordaje sistémico que se debe utilizar en el análisis e investigación de territorios bajo protección ambiental. Las interrelaciones entre los subsistemas ambiental, sociocultural y jurídico que convergen dentro del territorio Otomí-Mexica, es un claro ejemplo de la complejidad territorial. Ante esta perspectiva de carácter teórica-empírica, es necesario la construcción de pensamientos críticos enfocados hacia la complejidad y análisis integral de los territorios y fundamentados bajo tres perspectivas de análisis, ambiental, sociocultural y jurídico, para tratar de entender e instrumentar estrategias de desarrollo desde el mayor número de perspectivas y realidades.

## Referencias

- Arnold, M. y Osorio, F. La Teoría General de Sistemas y su aporte conceptual a las ciencias sociales. *La Nueva Teoría Social en Hispanoamérica. Introducción a la Teoría de Sistemas Constructiva*. 1a. edición.; Osorio, F., Arnold, M., González, S., Aguado, E., Eds.; México, 2008; volumen 11, pp. 19-43.
- Bertalanffy, L. *An Outline of General Systems Theory*. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1950, volume 1, pp. 134-165.
- Bertalanffy, L. *General System Theory. Foundations, Development, Applications*. 1968. New York.
- Bolio, H. J. El concepto de Desarrollo en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Hechos y Derechos*, 2013, número 14, pp. 1-5.
- Brunhes, J. *Principios de geografía humana de Francia*. 1910. Parias, Francia.
- Cappelletti, A. J. *La filosofía de Anaxágoras*. Editorial Sociedad Venezolana de Filosofía, 1984, Caracas, Venezuela.
- Barrientos, G. *Otomías del Estado de México*. CDI-PNUD, 2004, primera edición, México, D. F.

- Buzai, G. D. Geografía, Complejidad e Investigación Aplicada. Boletín de Estudios Geográficos, 2014, número 102, pp. 46-66.
- Chiras, D. *Environmental science: action for a sustainable future*. 3 Ed. Editorial Redwood, 1991.
- Cruz, R., Cruz, A., Cuevas, V., y Ramírez, B. Impacto social de la mercantilización de la naturaleza en la Sierra de Huautla, Morelos. *Estudios sociales*, 2018, volumen 28, número 51, pp. 2-22.
- CONABIO. Áreas Protegidas en México.  
Disponible en línea:  
<https://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot/enmexico.html> (acceso 15 de enero de 2019)
- CONANP. México conmemora 100 años de conservación y de la primer Área Natural Protegida. Disponible en línea:  
<https://www.gob.mx/conanp/prensa/mexico-conmemora-100-anos-de-conservacion-y-de-la-primer-area-natural-protegida> (acceso 18 de octubre de 2019).
- DOF. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas, 2014, Ciudad de México.
- DOF. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 2018, Ciudad de México.

- DOF. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2019. Ciudad de México.
- Durand, L. La relación ambiente-cultura en antropología: recuento y perspectivas. *Nueva Antropología*, 2002, volumen XVIII, núm. 61, pp. 168-184.
- Ellen, R. *Environment, subsistence and system. The ecology of small-scale social formations*. Ed. Cambridge, 1989, Cambridge University Press.
- García, R. *Drought and Man. Nature Pleads Not Guilty*. 1981. Oxford: Pergamon Press.
- García, R. (2000). *El conocimiento en construcción. De las formulaciones de Jean Piaget a la teoría de los sistemas complejos*. Editorial Gedisa, Barcelona, España.
- García, R. *Sistemas Complejos. Conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Editorial Gedisa, 2006, Barcelona, España.
- GEM. Decreto del Parque Ecológico Turístico y Recreativo Zempoala. La Bufa, que se denominará Parque Otomí Mexica del Estado de México. 1980, Toluca, México.
- GEM. Código para la Biodiversidad del Estado de México, 2005, Toluca, México.
- Harris, M. *El desarrollo de la teoría antropológica*, Editorial Siglo XXI, 1996, México.



- Humboldt, A. y Ritter, K. *Cosmos*. Tomo 1. Ed. Imprenta de Gaspar y Roig. 1874. Madrid, España.
- La Blanche, P. *Principios de Geografía Humana*. 1922.
- Juan, J. I. *Manejo del ambiente y riesgos ambientales en la región fresera del Estado de México*. Editorial Eumed. 2006. España, pp. 1-161.
- Juan, J. I., Camacho, J. M., Magallanes, M. d., Juárez, R., Pozas, J. G., Pérez, J. M., Villegas, D., García, I. E. y Vilchis, A. *Análisis socioespacial, geográfico, ambiental y ecológico del Parque Otomí-Mexica Estado de México*. Serie de Conservación y Manejo de Áreas Naturales Protegidas del Altiplano Mexicano. Editorial Eumed, 2017, volumen. II, pp. 224. España.
- Leff, E. *Pensar la Complejidad Ambiental, Complejidad Ambiental*. Leff, E., Eds. México Siglo XXI, 2000, pp. 1-297.
- Leff, E. *Sustentabilidad y racionalidad ambiental: hacia “otro” programa de sociología ambiental*. *Revista Mexicana de Sociología*, 2011, volumen 73, núm. 1, pp. 5-46.
- Miller, J. y Page, S. *Complex Adaptive Systems. An introduction to computational models of social life*. *Perspectivas Metodológicas*, 2007.

- Morales, G. y Rojas, D. El toro como recurso estético. Apuntes teóricos para una historia ambiental animal. *Abordajes*, 2015, volumen III, número 6.
- Morales, G. Las ciencias ambientales. Una caracterización desde la epistemología sistémica. *Revista Electrónica Nova Scientia*. 2017, volumen 9, número 1, pp. 646-697.
- Morin, E. *El Método II*. La vida de la vida. Ediciones Cátedra, 1980, Madrid, España, pp. 1-544.
- Nava, C. El pensamiento ambientalista. *Ciencia, ambiente y derecho*, 2012, pp. 1995-239.
- Ratzel, F. *Anthropogeographie*. Vol. 1. 1909, pp.1-428. Stuttgart, Alemania.
- Reale, G. y Antiseri, D. *Historia de la filosofía*. Editorial San Pablo, 2007, Buenos Aires, Argentina.
- Rodríguez, L. Epistemología y política de la metodología interdisciplinaria. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, 2014, volumen 4, número 1, pp. 1-8.
- Ruiz, M. y Castañeda, X. S. ¿Cómo abordar temas interdisciplinarios a partir de la Ecología Cultural? *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 2007, volumen 1, número 66, pp. 105-115.

SEMARNAT. El derecho a disfrutar de un medio ambiente sano se relaciona con la responsabilidad de proteger nuestros recursos naturales. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/inafed/articulos/el-derecho-a-disfrutar-de-un-medio-ambiente-sano-se-relaciona-con-la-responsabilidad-de-proteger-nuestros-recursos-naturales> (acceso 31 de enero de 2019).

Steward, J. *Theory of culture change. The methodology of multilinear evolution*. Urbana University of Illinois Press, 1955.

Steward, J. *El concepto y el método de la Ecología Cultural, Antropología Lecturas*. Bohannan, P. y M. Glazer., Eds.; Editorial McGraw Hill, España, 1993, pp. 331-344.

UAEMex. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Ambientales. 2016, UAEM, Toluca, México.

UMAR. Maestría en Ciencias Ambientales, 2019, UMAR, Puerto Ángel, Distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca.

UNAM. Licenciatura en Ciencias ambientales, 2016, UNAM, Ciudad de México.

Villatoro, F. El territorio como sistema complejo. *Estudios Centroamericano*. 2017, volumen 72, núm. 749, pp. 164-176.

- Villegas, D. Turismo rural como estrategia de desarrollo local sustentable en Isidro Fabela y la región de Monte-Alto, Estado de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2016.
- Villegas, D., Gutiérrez, J. G., Gómez, W., y Espinosa, L. M. Procesos que influyen en las transformaciones territoriales de zonas bajo diferentes políticas de manejo ambiental en el Parque Otomí-Mexica del Estado de México. *Transformaciones territoriales en México y Polonia: Vulnerabilidad, resiliencia y ordenación territorial*. Santana, M. V., Sánchez, R. M., Zepeda, F., Calderón, J. R. y Santana, G., Eds.; México, 2019, Editorial UAEMex, 1ª edición. Pág. 126.



# **METABOLISMO URBANO COMO PROPUESTA ALTERNATIVA A LA PROBLEMÁTICA ECOLÓGICA DE LAS CIUDADES**

Dainiz Noray Montoya Garcia<sup>1</sup>, Salvador  
Adame Martínez<sup>2</sup>, Edel Cadena Vargas<sup>3</sup>  
y Verónica Martínez Miranda<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). dainizmontoya@yahoo.com.mx

<sup>2</sup>Facultad de Planeación Urbana, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). sam\_ms@yahoo.com

<sup>3</sup>Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). edelcadena@yahoo.com.mx

<sup>4</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). mmirandav@uaemex.mx

## **1. Introducción**

Históricamente, las ciudades emergieron a partir de un excedente agrícola. Cuando las áreas rurales generaron un exceso en su producción, es decir, cantidades agrícolas y ganaderas por encima de las necesidades locales, surgieron entonces una cohorte de consumidores quienes se incorporaron en actividades políticas, militares, religiosas, así como en el intercambio mercantil concentrándose en un determinado espacio geográfico. Al mismo tiempo

que los excedentes aumentaron, los segmentos urbanos de la sociedad se acrecentaron y sofisticaron, debido a la presencia, cada vez más elaborada, de burocracias administrativas, instituciones ceremoniales y religiosas, redes de artesanos y comerciantes (Scott y Storper, 2013).

Fue así, que la urbanización comenzó entre cinco y seis mil años atrás con asentamientos que se convirtieron en lo que conocemos como las antiguas civilizaciones del Valle de Mesopotamia, Egipto, India y China. Por tanto, la división entre “pueblo” y “ciudad”, “urbano” y “rural” había comenzado (Anzano, 2010).

Aunque la urbanización consiguió impresionantes avances en varias regiones del mundo durante cinco mil años (la cultura griega, por ejemplo), el crecimiento urbano estaba aún sujeto a severas limitantes de manera generalizada. Incluso en las áreas donde la urbanización era relativamente robusta, no avanzó continua y linealmente, debido a que la mayoría de las ciudades cayeron en una trampa malthusiana (es decir, el incremento de su población fue tan grande que provocó que la cantidad de alimentos generada no fuera suficiente para sostenerla), como consecuencia, derivaron en niveles de población volátiles. Sin embargo, durante la era de la explotación europea de América (siglos XVI y XVII), algunas de estas limitaciones

comenzaron a reducirse. Los costos del comercio a larga distancia comenzaron a disminuir de manera importante, lo cual permitió el surgimiento de interconexiones más estrechas entre centros urbanos muy distantes (Scott y Storper, 2013).

No fue sino hasta finales del siglo XVIII, principalmente en Europa Occidental, cuando la trampa malthusiana empezó a perder importancia de manera decisiva, debido a un crecimiento sin precedentes en los niveles de productividad económica, detonado por la Revolución Industrial. Esto no sólo volvió posible la producción de bienes manufacturados en cantidades y variedades hasta ese momento nunca vistas, sino que también permitió sortear las limitaciones y caprichos de la agricultura a través de la mecanización. La Revolución Industrial dio paso a la era moderna, durante la cual la urbanización comenzó a extenderse (*Ibidem*).

De esta manera, mientras la industrialización avanzó en los países capitalistas más desarrollados en el siglo XIX, también estimuló el crecimiento económico y urbano que culminaron en las grandes ciudades manufactureras de Estados Unidos y Europa Occidental. Después, particularmente hacia la mitad del siglo XX, ciertas ciudades en desarrollo en todo el mundo se expandieron, a raíz de los programas de industrialización orientados a los mercados nacionales bajo estrategias de desarrollo



impulsadas por sus respectivos gobiernos y bajo las nuevas normas del sistema capitalista.

No obstante, a partir de los años setenta, muchos países desarrollados empezaron una política de desindustrialización, esto originó una descentralización del sector manufacturero y la transferencia de las industrias a los países en desarrollo, sobre todo América Latina y Asia, lo que ha desencadenado un resurgimiento del proceso de urbanización en el hemisferio sur.

Es así como con la consolidación del neoliberalismo (años ochenta), las ciudades han pasado de centros manufactureros a varios tipos de ocupaciones y sectores de alta tecnología, administración, logística, servicios, diseño y cultura. La globalización ha continuado y con ello, se ha provocado el surgimiento de una nueva división internacional del trabajo, que se reflejó en una intensa ola de urbanización en los países en desarrollo, donde muchas ciudades ahora funcionan como importantes productores de exportaciones manufactureras (Hong Kong, Seúl, Shanghai, Singapur, Ciudad de México, Sao Paulo).

Actualmente, una alta proporción de la humanidad está más urbanizada que nunca, particularmente porque se ha roto decisivamente con la trampa malthusiana, a raíz del crecimiento de las

capacidades productivas de la industrialización dentro del contexto del capitalismo.

Hoy en día, la razón de las ciudades reside en su papel como centro de producción e intercambio económico dentro de un sistema más amplio de comercio regional, nacional e internacional. Sin embargo, las ciudades están marcadas por características sociales, políticas y culturales adicionales, muchas de las cuales influyen sobre la forma precisa en que se da la producción y el intercambio.

## **2. La problemática de la ciudad**

En la era del Antropoceno (Crutzen, 2002), las actividades impulsadas por el ser humano están asociadas con los impactos hacia el ambiente. Originalmente, las fuerzas de la naturaleza dominaban los procesos del planeta, sin embargo, con el ascenso de la industrialización y la urbanización los sistemas naturales llegaron a ser invadidos con tecnologías que movilizaron a la gente, bienes e información a un paso agigantado, fue así como el hombre se convirtió en la fuerza dominante en el traslado de materiales alrededor del planeta (Dijst, 2017).

Durante el siglo XX, el uso de materiales se incrementó 800% en el período de 1900 a 2005. Hoy

en día la humanidad emplea alrededor de 60 mil millones de toneladas anuales (Gt) de materiales al año, siendo más de una tercera parte de biomasa, 21% combustibles fósiles y 10% minerales (Krausmann *et al.*, 2009). En cuanto a los recursos energéticos, el consumo de energía es de 15 teravattios (TW, es decir,  $10^{12}$  vatios) por año (Castro, 2011) y se espera que se duplique en los próximos 50 años, derivados del crecimiento poblacional y el desarrollo económico mundial (Mohale, 2015).

De 1950 a la fecha, la extracción global de materiales, ronda entre los 70 mil millones de toneladas al año, esto significa un aumento de 5.6 veces (de 1900 hasta hoy, han sido 10 veces). Al mismo tiempo la generación de residuos se ha incrementado cinco veces (los plásticos hasta 150 veces), la población 2.5 veces y la economía 37 veces (Delgado, 2017).

Además, el crecimiento urbano, el demográfico e industrial, así como el aumento en la producción y consumo de bienes hace que la demanda del recurso hídrico (uno de los más importantes para el sostén de la vida) sea cada vez mayor. Las aguas subterráneas que abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego. El 20% de los acuíferos del planeta están siendo sobreexplotados,

lo que va a producir graves consecuencias, como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada. Por lo tanto, se prevé que en el 2030 el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40% de agua en un escenario climático si los patrones actuales se mantienen (UNWATER, 2015).

Es así, que las urbes consumen entre el 67% y el 76% de la energía mundial y son los responsables de aproximadamente el 76% de las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). A nivel global, esto significa que la humanidad está ejerciendo una presión enorme sobre el sistema terrestre, que podrían desestabilizar los sistemas biofísicos, y podrían desencadenar o generar cambios irreversibles en el ambiente y que deteriorarían su propio bienestar (Rockström *et al.*, 2009). Esto es, se están atravesando los límites de resiliencia del planeta, que se manifiestan en cambios en los patrones climáticos a nivel local, regional y global. No obstante, tan sólo las 380 ciudades más relevantes de los países desarrollados son responsables de alrededor del 60% del PIB, lo que las coloca prácticamente como los mayores centros consumidores del planeta (Delgado, 2014).

Por otro lado, es importante señalar que el proceso de urbanización del planeta ha sido histórica y geográficamente desigual, ya que el grueso de los

asentamientos irregulares que son el 32% de la población mundial urbana están en los países pobres. Muchas ciudades capitales del hemisferio sur se expandieron rápidamente durante la segunda mitad del siglo XX, sobre todo como resultado de la migración rural y la alta concentración de las actividades económicas. En Asia países como China e India esencialmente, pero también ciertas regiones de África se colocan en esta dinámica ya que registran en promedio, sólo un 45% y 40% de población total urbana respectivamente (ONU, 2011 en Delgado, 2015). Para el periodo de 1970 a 2005 el crecimiento de la mancha urbana en América Latina se ubicó en el 1.8% anual lo que corrobora una continuidad en el fuerte desbalance territorial de la región y que hoy se observa en el hecho de que el 78% de la población ya es urbana (Delgado et al., 2012). Por tanto, el panorama mundial inmediato es complejo, pues el aumento de la población a 2050 se concentrará en un 95% en los países pobres o en desarrollo, llegando incluso a duplicar el número de habitantes a principios de siglo.

En el caso de América Latina, sus urbes son íconos representativos de inmensos y típicos (des)ordenamientos territoriales cuyos patrones de expansión han sido acelerados además de ser socialmente muy excluyentes, al mismo tiempo son ambiental e inclusive inviables en el largo plazo

(Delgado *et al.*, 2012). El porcentaje de población que viven en zonas de alta marginación es del 27% en promedio, aunque se estima en el orden de 19.6% en México; 36.6% en Brasil; 33.1% en Argentina; 68% en Perú, por mencionar algunos ejemplos (Davis, 2006; Delgado, 2014).

Dado el tipo de economía que caracteriza a la región, dígase primario-exportadora y en el mejor de los casos, maquiladora, pero también a la inestabilidad de la misma y a los altos índices de inequidad, el resultado de tal dinamismo urbano es que las ciudades latinoamericanas figuran como íconos representativos de planeaciones poco eficientes en cuanto a la calidad de vida que ofrecen a sus pobladores, es decir, acceso a un empleo digno, movilidad eficiente, bajos índices de contaminación atmosférica, entre otros. A pesar de esto, se espera que la tasa de crecimiento de las urbes siga ascendiendo hasta alcanzar el 87% de la población urbana para el 2050 (Delgado, 2015b).

Es por ello por lo que, ante este preocupante escenario, resulta necesario el planteo de nuevos paradigmas urbanos, no sólo aquellos reconocidos en el ámbito de especialistas (arquitectos, urbanistas, ingenieros civiles, etc.), sino también de otros que aboga por un genuino buen vivir urbano y en general por el *bien común de la humanidad* (Houtart, 2014). En este punto, se sostiene que el metabolismo

urbano puede ser una herramienta analítica del ámbito biofísico de una ciudad, pero debe estar acompañado en todo momento de una visión crítica de lo socioeconómico, ambiental y político para la construcción de alternativas reales para la humanidad.

### **3. La ciudad como ecosistema y el metabolismo urbano**

Los orígenes del planteamiento urbano moderno están en los procesos de urbanización que ocurrieron en Europa desde mediados del siglo XIX y hasta principios del siglo XX. Ante el crecimiento económico y poblacional, entonces se realizaron esfuerzos sin precedentes para organizar ambiental y socialmente ciudades de una magnitud nunca vista, cuyo nivel de congestión era señalado como la causa de todos los problemas. Las medidas que estructuraban las políticas urbanas apuntaban, por un lado, a controlar físicamente el crecimiento y por otro, a evitar el hacinamiento disminuyendo la densidad habitacional y de los edificios construidos.

La configuración de estas políticas jugaba un papel muy importante en la corriente reduccionista y mecanicista imperante de la época, consagrada a los avances tecnológicos y productivos que originaron la era de la industrialización.

Bajo la perspectiva mecanicista, la ciudad era una gran máquina, similar a las fábricas y formada por componentes elementales, con un orden geométrico simple y exacto, de “una claridad deslumbrante y una armonía arrebatadora”. Su funcionamiento podía deducirse estudiando sus elementos constitutivos básicos y descubriendo los mecanismos que los ponían en funcionamiento (Boccolini, 2016).

Este enfoque determinista y mecanicista presentaba a la ciudad como un mecanismo que funcionaba de acuerdo con criterios fijados de forma apriorística y externa, en un proceso de diseño que define exclusivamente su forma de operación, y que no deja lugar al “informalismo” o el azar; la ciudad era una construcción física que podía organizarse con éxito a fin de controlar, modificar o promover determinados procesos sociales y productivos (*Ibidem*).

Fue así como la disciplina del urbanismo se forjó en esta visión parcial y reduccionista que refleja de alguna forma también la concepción liberal de las ciencias sociales desde la que se deducen las grandes ramas que estructuraron la disciplina urbanística.

Las tendencias emergentes en el planteamiento urbano contemporáneo esbozan una ruptura con líneas conceptuales y operativas hegemónicas:



entienden la naturaleza dinámica, compleja e interdependiente de los centros urbanos, sugiriendo un proceso de intervenciones iterativas con el sistema urbano de forma continua y flexible; estructurando el análisis con un enfoque que entiende a la ciudad como un sistema complejo, un nodo que es a la vez un conjunto de procesos internos y parte de una red mayor de actividades humanas sobre el territorio.

Hoy en día al hacer un análisis de una urbe, los planificadores son más conscientes de las consecuencias sociales, económicas y ambientales de sus decisiones, considerando a la ciudad como un sistema complejo y diverso.

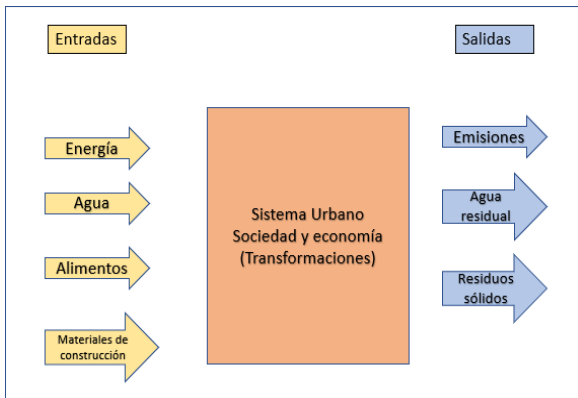
El enfoque sistémico, que entiende a la ciudad como un sistema complejo en desarrollo, ha sido propuesto como un marco interpretativo e instrumental de la ciudad desde la geografía de Harvey, la sociología de Luhmman, la biología de Rueda, y el urbanismo de Jacobs, Salingerons, Soja, Batty y muchos otros (Boccolini, 2016) como economistas y ecologistas.

El enfoque sistémico involucra a las urbes como ecosistemas. Se sabe entonces que en cualquier ecosistema planetario se puede describir por los flujos de materia y energía que discurren por él. La materia circula entre los seres vivos y el medio formando un círculo cerrado (renovándose

continuamente de forma cíclica). En cambio, la energía en aplicación del segundo principio de la termodinámica, lo hace en forma de un flujo que se degrada continuamente. Los seres vivos necesitan degradar energía y materiales para mantenerse vivos, la única manera de regenerar esta energía entrópica en los sistemas abiertos terrestres es la utilización de la energía del sol, que fijada a través de la fotosíntesis es empleada después por otros seres vivos en la cadena trófica. Es así como la vida en el planeta se ha mantenido en el tiempo (Higueras, 2009).

En la ciudad aparece un medio urbanizado y una serie de seres vivos, con sus interacciones y relaciones, donde el ser humano es la parte más importante del mismo. Aparecen entonces las actividades humanas al interior de la urbe, con los intercambios de energía, materia e información. En este sentido, estas características son muy similares a las de un ecosistema natural, a su vez, que el ser humano y sus sociedades son subsistemas de éste. No obstante, la ciudad incumple con dos de los requisitos básicos en la naturaleza: i) no posee un metabolismo de ciclo cerrado o circular; y ii) no tiene una fuente inagotable de energía (como el sol), que garantice indefinidamente su funcionamiento (*Ibidem*).

Las ciudades modernas son caracterizadas por el uso de enormes cantidades energía y materiales como una enorme fuerza motriz para sus actividades metabólicas, que incluyen la producción de energía eléctrica, el transporte de bienes, construcción de edificios e infraestructura, la vida doméstica de los residentes y la emisión y tratamiento de residuos (Lei *et al.*, 2018). Estos movimientos son considerados en un ecosistema como flujos horizontales, y esto genera enormes desequilibrios a escala planetaria. Es por ello por lo que se considera que la ciudad tiene un metabolismo lineal (Figura 1).



Fuente: Alfonso Piña y Pardo Martínez, 2013

Figura 1. Metabolismo lineal de la ciudad

Por otro lado, el funcionamiento de la ciudad está basado en energías secundarias (no primarias), como la electricidad, el petróleo o el gas. El

consumo de estas energías es lo que, a lo largo de la historia, y sobre todo en los últimos dos siglos, ha permitido el crecimiento y mantenimiento de las ciudades, a base de transportar recursos desde cualquier punto del planeta y trasladando sus desechos a zonas circundantes. Esto también equivale a grandes recorridos horizontales capaces de explotar otros ecosistemas lejanos y provocar importantes desequilibrios territoriales (Higueras, 2009).

Ahora bien, el metabolismo urbano es un concepto que involucra el término μεταβολικός (metabolikós), un concepto biológico, el cual fue acuñado en el siglo XIX por Theodor Schwann, y cuyos orígenes se remontan a la teoría económica de Karl Marx (Zhang, 2013). El metabolismo urbano se refiere a la “suma total de los procesos tecnológicos y económicos que ocurren en una ciudad, resultando en el crecimiento, producción de energía y eliminación de residuos” (Kennedy, 2007), esto es, la operación completa de una urbe.

Aunque los orígenes del concepto se remontan al siglo XIX, el campo de estudio del metabolismo urbano es un campo nuevo del siglo pasado con los estudios hechos por Wolman (1965), y es fundamental para el desarrollo de ciudades sustentables, a través de la generación de parámetros con los cuales los expertos pueden medir y evaluar

los impactos ambientales de las ciudades (Kennedy *et al.*, 2011).

Ahora bien, desde la concepción de Wolman (1965), el metabolismo urbano fue estudiado por razones prácticas, particularmente en lo concerniente con la contaminación del aire y los desechos producidos en las ciudades norteamericanas. Sin embargo, es posible llevar a cabo investigaciones más profundas bajo esta perspectiva (Kennedy *et al.*, 2011).

- a) Indicadores de Sustentabilidad. El estudio del metabolismo urbano como una parte integral del Estado del Medio Ambiente (SOE por sus siglas en inglés) reporta y provee medidas que son indicativos de la sustentabilidad de una ciudad. En este caso, el metabolismo urbano incluye información sobre la eficiencia energética, ciclos de materiales, manejo de residuos e infraestructura en las urbes.
- b) Insumos para la contabilidad de los gases de efecto invernadero. El metabolismo urbano puede ayudar a la cuantificación de los gases de efecto invernadero en una ciudad. Aunque este parámetro ya está incluido en la cuantificación misma del metabolismo, podría ampliar el alcance de esta medición fuera de las fronteras de la urbe, por ejemplo,

en el caso de la generación de electricidad y de la disposición de residuos sólidos.

- c) Modelos matemáticos para el análisis de políticas. Mientras muchos investigadores usan primordialmente el metabolismo como la base de un marco de referencia contable, otros han empezado a diseñar modelos matemáticos de los procesos dentro del metabolismo de la ciudad. Algunos de estos modelos han sido ampliamente desarrollados por MFA (metabolic flux analysis), generalmente para estudiar sustancias en particular (como nutrientes o metales en una región o zona urbana). Estos modelos además de determinar la existencia y los flujos de una sustancia pueden servir para simular cambios futuros en el metabolismo urbano como resultado de intervenciones tecnológicas o políticas.
- d) Diseño de herramientas. El potencial uso del concepto de metabolismo urbano en un diseño relativamente nuevo. Algunos estudiosos han empleado esta perspectiva para el diseño de infraestructura sustentable en una urbe. Investigadores como Oswald y Baccini (2004) han empezado a demostrar como la combinación de herramientas morfológicas y fisiológicas pueden usarse en

el “*largo proceso de reconstrucción de la ciudad*”. El rastreo de los flujos de energía y materiales en el diseño urbano puede reducir los impactos ambientales.

Es así como en los últimos 20 años han estado marcados por el incremento en el estudio del metabolismo de las ciudades, lo que está asociado con los avances tecnológicos que permiten la administración de grandes volúmenes de datos y modelos con gran precisión y complejidad (Céspedes *et al.*, 2018), Tabla 1.

Tabla 1. Estudios sobre metabolismo urbano en los últimos 20 años

Año	Metodología		Autor/ Publicación	Contribución
	Métodos sobre energía	Métodos sobre materia		
1965		Balances de materia y energía	Wolman (1965)/ The metabolismo f the cities	Es el primer estudio sobre el metabolismo de las ciudades en una ciudad hipotética con un millón de habitantes.
1975		Balances de materia y energía	Newcombe (1975)/ Energy use in Hong-Kong. Parte I, anoverview	Presentación del metabolismo urbano como un método para determinar la sustentabilidad de las ciudades y el establecimiento de impactos (en términos de demanda) de las ciudades modernas, basados en un estudio de caso en Hong Kong.

1990		Balances de energía y material ecológico	Girardet (1990). Closingthecycle	Presentación del metabolismo circular como la base del logro de la sustentabilidad en Europa, en ciudades típicas (paradigma técnico-material).
1999		Análisis del flujo de materiales (MFA)	Newman (1999)/Sustentabilidad y las ciudades. Extendiendo el modelo metabólico	Estudios en el cual los elementos de habitabilidad y calidad de vida son añadidos en la búsqueda para un modelo extendido del metabolismo urbano en la ciudad de Sydney.
2001		Huella Ecológica	Warren-Rhodes and Koenig (2001)/ Ecosystem appropriation by Hong Kog and its implications for sustainable development	Comparación entre la huella ecológica de Hong Kong y la ciudad china de Guangdong
2007		Análisis de flujo de materiales	Kennedy (2007)/ The changing metabolims of cities	Estudio sobre la aceleración del metabolismo en ciudades de siete casos de estudio: Bruselas, Sydney, Hong Kong, Tokio, Toronto, Vienna y Londres
2009	Análisis de las redes ecológicas, Análisis de energía		Zhang <i>et al.</i> (2009) Ecological network and emeryanálisis of urban metabolism systems: Model development and a case study of four Chinese cities	Estudio de las interacciones entre los sistemas agrícola, doméstico e industrial dentro del marco del metabolismo urbano en Beijing, Tianjin, Shanghai y Chongqing.
2010	Análisis de las redes ecológicas		Zhang <i>et al.</i> (2010). Ecological network analysis of an urban wáter metabolic system: Model development a case of study for Beijing	Estudio de los flujos de agua en la ciudad de Beijing, incluyendo el agua para beber y el agua de lluvia
2011		Análisis de flujo de materiales urbanos e Indicadores	Minx <i>et al.</i> (2011). Approach to Assess Urban Metabolism in Europe	Metodología para el análisis de la calidad ambiental y urbana a través de indicadores relacionados con el



		socioeconómicos, de calidad de vida y forma urbana		metabolismo urbano en Londres, Manchester, Hartlepool y Brighton.
2012		Balances de materia y energía en la huella ecológica	Browne <i>et al.</i> (2012). Comparison of energy Flow accounting, energy Flow metabolism ratio analysis and ecological footprint as tools for measuring urban sustainability. Case of study of a Irish city-region	Discusión y evaluación de la sustentabilidad de la ciudad de Limerick y su consumo de energía
2013		Análisis de Flujo de materiales e indicadores socioeconómicos	Chrysoulakis <i>et al.</i> (2013). Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project.	Establecimiento de una herramienta de planificación urbana basada en el metabolismo urbano para las ciudades de Helsinki, Atenas, Florencia, Londres y Gliwice.
2015	Análisis de las redes ecológicas		Zhang <i>et al.</i> (2015). Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case of study Beijing, China	Estudio del flujo de carbono dentro de la ciudad de Beijing en el período de 1990-2010.
2017	N/A	N/A	Rosales Carreón y Worrell (2017). Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism	Discusión sobre la importancia del metabolismo de la energía en el marco de la sustentabilidad. Identificación de áreas de búsqueda para la mejora del análisis de energía en el metabolismo urbano.
2017	Análisis de Energía	Análisis de flujo de materiales, aproximación al ciclo de la vida y la huella	Li y Kwan (2017). Advancing analytical methods for urban metabolism studies	Revisión de aproximaciones metodológicas para el metabolismo urbano de las ciudades, y la identificación de las

		ecológica		necesidades actuales para la mejora de los estudios del metabolismo urbano.
--	--	-----------	--	---

Fuente: Céspedes y Morales-Pinzón, 2018.

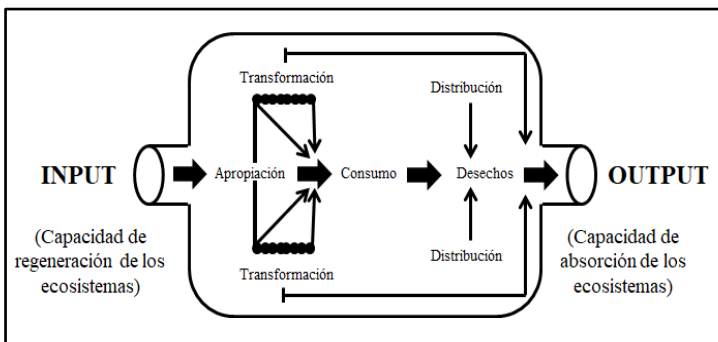
#### 4. Metabolismo urbano y su aspecto social

El metabolismo entre la naturaleza y la sociedad contiene dos dimensiones o esferas: un material, visible o tangible y otra inmaterial, invisible o intangible. El metabolismo comienza cuando los seres humanos socialmente agrupados se apropian de materiales y energías de la naturaleza (input, entradas) y finaliza cuando depositan desechos, emanaciones o residuos en los espacios naturales (output, salidas) Sin embargo, entre estos dos fenómenos ocurren además procesos dentro de la sociedad por medio de los cuales las energías y materiales apropiados circulan, se transforman y terminan consumiéndose (Figura 2). Por lo tanto, en el metabolismo social existen tres tipos de flujos de energía y materia: los flujos de entrada, los flujos interiores y los flujos de salida (Toledo, 2013).

Algunos autores han categorizado las interacciones tangibles en la ciudad y ecosistemas basadas en cinco procesos: la *apropiación* que involucra la extracción de materiales brutos y energía provenientes de los sistemas naturales; la

*transformación* consiste en todos los procesos necesarios para la producción de bienes y servicios derivados de la materia y energía; la *circulación* que está relacionada al transporte y distribución de materia y energía (en la forma de bienes y servicios); el *consumo* y la *excreción*, el cual se refieren a los desechos generados y su disposición (Céspedes y Morales-Pinzón, 2018).

Estos procesos de la dimensión tangible ocurren tanto en la ciudad como en un ambiente natural, son multi escala y en muchos casos, espacialmente discontinuos. Así, los procesos de apropiación, circulación, consumo y excreción pueden ocurrir tanto en la interacción del sistema urbano como con los ecosistemas que la rodean y a través de la interacción con ecosistemas más lejanos. Esta condición particular de las ciudades como sistemas socioeconómicos habilita la definición del metabolismo de estos sistemas a través de la existencia de relaciones próximas y distantes de los ecosistemas que dan sostén a las ciudades (*Ibidem*).



Fuente: González de Molina y Toledo, 2011.

Figura 2. El metabolismo social

Sin embargo, un entendimiento de la dimensión tangible a través de los cinco procesos no se podría llevar a cabo si no se consideran algunos elementos del sistema social (cultura, política, economía, etc.) que estructuran también el metabolismo urbano, es decir, que estructura la parte intangible del sistema (Zhang, 2013).

La dimensión intangible se compone de todos los aspectos socioeconómicos que son parte de la estructura del ser humano como individuo y ser social: imaginarios, percepciones, leyes, instituciones, conocimientos, políticas, tradiciones, economía y las estructuras de las relaciones sociales y en general, la cultura que influyen en los flujos de materia y energía (Toledo, 2013).

El reconocimiento de la dimensión intangible dentro del metabolismo urbano ha sido uno de los elementos que han marcado la evolución del concepto desde el que estableció Wolman, quien se

enfocó primordialmente a los aspectos tangibles. Es así que, para integrar ambas dimensiones del metabolismo urbano, es necesario cambiar el paradigma basado en el estudio de los flujos tangibles del ecosistema urbano para dar paso a la redefinición del concepto a “la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en la ciudad, resultando en el crecimiento, producción de energía y la eliminación de los residuos” (Kennedy, 2007; Céspedes y Morales-Pinzón, 2018).

La planeación metabólica integral, como ya se ha descrito, debe por tanto incluir en su diagnóstico, acciones tanto de mitigación, adaptación, prevención, desde la perspectiva multi-escala y multi-dimensional (Delgado, 2012). Se trata de un ejercicio que debe reconocer los potenciales y beneficios, que produzcan una ciudad con una mejor relación con la calidad de vida de sus habitantes, los ecosistemas circundantes y el cambio climático.

## **5. Conclusiones**

Las ciudades son creaciones del hombre que modifican el entorno donde se asientan, pues requieren de los ecosistemas circundantes para su supervivencia. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial hasta en la actualidad, el crecimiento urbano ha tenido impactos en la

naturaleza, de tal manera que están rebasando los límites biofísicos que el mismo planeta tiene. Esto es debido a que cada vez, se necesitan más recursos materiales y energéticos para sostenerla.

A partir de los años setenta del siglo pasado, las ciudades europeas empezaron a desindustrializarse, lo que produjo una explosión en el crecimiento de las urbes en el hemisferio sur, sobre todo en América Latina. Este crecimiento ha sido desordenado y complejo lo que ha causado cinturones de miseria, desigualdad social y crecimiento sin planificación principalmente por políticas neoliberales que han hecho de las urbes, centros de maquilación de mercancías.

A partir de los estudios de Wolman en 1965, ha surgido una nueva perspectiva teórica: el metabolismo urbano. Esta propuesta permite analizar a las ciudades como ecosistemas, con lo cual es posible cuantificar, evaluar y planificar los flujos de materiales y energía, con el objetivo de construir una urbe sustentable.

Esta perspectiva involucra los aspectos físicos de una ciudad (aspectos tangibles), como aspectos propios de la naturaleza humana (creencias, políticas, leyes, instituciones) con lo cual el metabolismo urbano propone la construcción de una ciudad de manera integral. Esta alternativa desde su aspecto económico-biológico y planteando a las

urbes como sistemas termodinámicos abiertos a la entrada, salida de energía y materiales, permitiría a los planificadores urbanos la creación de urbes desde aspectos integrales. Diversos investigadores promueven que a través del metabolismo urbano será posible la mitigación de emisión de gases de efecto invernadero, el seguimiento de algún material y con ello una mejor planificación y la creación de ciudades resilientes.

Es por ello, que resulta indispensable el estudio de las ciudades a través del metabolismo urbano sobre todo las que están creciendo sin planificaciones concretas, como es el caso de América Latina, principalmente México.

## **Referencias**

- Alfonso Piña, William H., Pardo Martínez, Clara Inés. Urban material flow análisis: An approach for Bogota. *Colombia. Ecological Indicators*. 2013. XXX.
- Anzano Jericó, Javier. El proceso de urbanización en el mundo. *Sección del temario de oposiciones de Geografía e Historia. Proyecto Clío* 26. 2010. ISSN. 1139:6237.
- Boccolini, Sara María. El evento urbano. La ciudad como un sistema complejo lejos del equilibrio. *QUID* 16. 2016. No. 6. pp 186-218.

- Castro, Jorge. Perspectivas energéticas de la demanda energética global. Instituto de *Planeamiento Estratégico (IPE)*. 2011 Petrotecnia. Febrero. Extraído de: [http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-31\\_01-06-51103776.pdf](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-31_01-06-51103776.pdf)
- Céspedes Restrepo, Juan D.; Morarlez-Pinzón, Tito. Urban metabolism and sustainability: *Precedents, genesis and research perspectives. Resources, Conservation and Recycling*. 2018. 131, pp 216-224.
- Crutzen, Paul J. Geology of mankind. *Nature*. 2002 415.23.
- Davis, M. (2006). Planet of Slums. Londres/ New York, Versus. En Delgado, Gian Carlo. (2014). Ciudad, agua y cambio climático: una aproximación desde el metabolismo urbano. Medio Ambiente y Urbanización. Vol 80. No. 1. Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo – América Latina. Buenos Aires. pp. 95-123.
- Delgado Ramos, Gian Carlo; Campos Chávez, Cristina; Rentería Juárez, Patricia. Cambio Climático y el Metabolismo Urbano de las grandes urbes Latinoamericanas. *Hábitat Sustentable*. 2012. Vol. 2. No. 1, pp 2-25.
- Delgado Ramos, Gian Carlo. Ciudad, agua y cambio climático: una aproximación desde el



- metabolismo urbano. *Medio Ambiente y Urbanización*. 2014. Vol 80. No. 1. Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo – América Latina. Buenos Aires. pp. 95-123.
- Delgado Ramos, Gian Carlo. Ciudad y Buen vivir: ecología política urbana y alternativas para el bien común. *Revista THEOMAI*. 2015. No. 3
- Delgado Ramos; Gian Carlo. Ciudad, ecología, clima y bien común: estado de situación, retos y perspectivas desde América Latina. *Entornos*. 2015b. Vol 28. No. 2. Universidad Surcolombiana. Vicerrectoría de Investigación y Proyección social. pp 82-92.
- Delgado, Gian Carlo. Agua y el reto de la (in)sustentabilidad urbana en México. *La jornada de Oriente*. 2017. Extraído de:  
<http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2017/03/22/agua-reto-la-insustentabilidad-urbana-mexico/>
- Dijst, Martin. Exploring urban metabolism – Towards an interdisciplinary perspective. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.014>.
- González de Molina, Manuel; Toledo, Víctor M. Metabolismos. Naturaleza e Historia. *Hacia una teoría de las transformaciones socioecológicas*. 2011. Editorial Icaria. Primera Edición.

- IPCC - Intergovernmental Panel of Climate Change. Summary for Policymakers. Working group III contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). *Climate Change*. 2014: Mitigation of Climate Change. Sesión 39 del IPCC. Abril 2014.
- Higueras, Ester. La ciudad como ecosistema. *Parte del libro "El reto de la ciudad habitable y sostenible"*. 2009. Editorial APP. Capítulo 2.
- Houtart, Francois. De los bienes comunes al bien común de la Humanidad. *El Ágora USB*, 2014. Vol. 14, núm 1. Universidad de San Buenaventura Seccional Medellín. Colombia. pp 259-293.
- Kennedy, C. The changing metabolism of cities. *J. Ind.* 2007. No. 11. pp 43-59
- Kennedy, C., Pincetl, S., Bunje, P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*. 2011. No. 159, pp 1965-1973.
- Krausmann, Fridolin; Gringrich, Simone; Fischer-Kowalski, Marina. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*. 2009. No. 68. 2696-2705.
- Lei Kampeng, Lu Liu, Inchio Lou. An evaluation of the urban metabolism of Macao from 2003 to 2013. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018, No. 128, pp 479-488.

- Mohale, Bonang. There is no silver bullet to meet Africa's Energy Challenges. *World Energy Focus. Insights from and for the council's global leadership community*. Annual 2015. Extraído de: <http://worldenergyfocus.org/wp-content/uploads/2015/11/Annual-2015-Web-Full-01.pdf>
- Oswald, Franz; Baccini, Peter. Netzstadt, Designing the Urban. *Urban Design International*. 2004. Vol. 9, Issue 2.
- Rockström, Johan; Steffen, Will; Crutzen, Paul; Foley, Jonathan. Planet Boundaries: Exploring the safe operating space for Humanity. *Ecology and Society*. 2009. No. 14 (2). Extraído de: <http://www.ecologyandsociety.org/wol14/iss2/art32/>.
- Scott, Allen.; Storper, Michael. La Naturaleza de las ciudades: el alcance y los límites de la teoría urbana. Especialidades. *Revista de temas contemporáneos sobre lugares, política y cultura*. 2013. UAM. Vol. 3, núm, 2. pp 6-33.
- Toledo, Víctor M. El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones*. 2013. No. 136, pp 41-71.
- UNWATER. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015. *Agua para un mundo sostenible. Datos y Cifras*. 2015 Extraído de:

[http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts\\_Figures\\_SPA\\_web.pdf](http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf)

Wolman, A. The Metabolism of Cities. *Scientific American*. 1965. No 213, 179-190.

Zhang, Y. Urban metabolism: a review of research methodologies. *Environmental Pollution*. 2013. No 178. pp 463-473.

# ECOLOGÍA POLÍTICA

---



# **EL DISCURSO DE LA ESCASEZ: UNA CRÍTICA DESDE LA ECOLOGÍA POLÍTICA PARA REPENSAR LA CRISIS DEL AGUA EN LAS CIUDADES**

Aracely Rojas López<sup>1</sup>, Lilia Zizumbo Villarreal<sup>2</sup>  
y Emilio Gerardo Arriaga Álvarez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). aracelymar@gmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Turismo y Gastronomía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). lzv04@yahoo.com

<sup>3</sup>Instituto de Estudios sobre la Universidad (IESU),  
Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).  
egearriaga@gmail.com

## **1. Introducción**

Para hablar sobre las diferentes perspectivas de la crisis del agua, nos permitimos abordar uno de los casos de escasez de agua más recientes a nivel mundial: el llamado “Día Cero” en Ciudad del Cabo, en Sudáfrica. Dicha ciudad padece escasez del agua hace más de una década, sin embargo, a partir del año 2018 tiene un abasto condicionado a 50 litros por persona al día, la cantidad mínima de litros recomendada para el consumo diario y personal por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Esta política pública restringe la dotación del agua, sin considerar las necesidades personales y/o colectivas para la alimentación y la higiene, lo que establece el primer antecedente con respecto al racionamiento y dosificación del agua en el mundo, al menos en términos legítimos de la política ambiental. Tal condición permite visibilizar la desigualdad en la distribución del agua que obedece a estas políticas que buscan garantizar la dotación de agua al centro de la ciudad para actividades turísticas, zonas residenciales y financieras; y en un segundo orden el abasto para la población que habita en la periferia de la ciudad. Esta desigualdad distributiva del agua también puede entenderse como un asunto de clase social (Delgado, 2005).

La prensa internacional coincide en que el “Día Cero” logró ser aplazado para el año 2019, ya que temporalmente se logró establecer la política de racionamiento de agua, no obstante, el panorama en términos ambientales no es alentador (El Economista, 2018; Forbes, 2018). El cambio climático y la situación geográfica de Sudáfrica hacen susceptible a Ciudad del Cabo al agotamiento del agua de sus mantos freáticos, por tanto quedará sujeta a formas de extracción y potabilización de aguas más agresivas para el ambiente como la desalinización, además de los múltiples conflictos socioambientales derivados de la falta del vital líquido.

El caso del “Día Cero” como referencia de un punto crítico de escasez del agua en el territorio, permite visibilizar que esta situación puede desencadenarse en cualquier sitio del planeta, particularmente en el contexto de las ciudades que son el centro de producción industrial. “El problema no radica en que las reservas de agua sean cada vez menores sino en que su localización y calidad están cambiando. Por un lado, hay crecientes índices de contaminación del agua mientras que, por el otro lado y como resultado -entre otros factores- del calentamiento global, está registrándose una reubicación espacial de las precipitaciones y con ella de la localización de las reservas” (Delgado, 2005, p. 34). Lo anterior implica, que la distribución del agua sea desigual y por tanto que los efectos del “Día Cero” se encuentren latentes en otras partes del mundo a gran escala. Según la revista Forbes México, las ciudades de Ciudad del Cabo, Sao Paulo, Bangalore, Pekín, El Cairo, Yakarta, Moscú, Estambul, Ciudad de México, Tokio y Miami; son las ciudades con mayor escasez del agua en el mundo (Forbes, 2018).

Si bien, el caso anterior permite mostrar un referente mundial en términos de la escasez del agua, este documento tiene como objeto discutir el asunto de escasez del agua para América Latina (AL) y México, a partir del análisis del discurso de



escasez y su crítica desde la ecología política. Para lo cual se plantean algunos cuestionamientos iniciales: ¿A qué se refiere la escasez del agua y cuáles son las diferentes perspectivas teóricas sobre la escasez del agua? ¿Es la escasez el origen de la crisis del agua? ¿Cuáles son las ciudades en AL y México con mayor afectación por la escasez del agua y como enfrentan dicha problemática?

Estos cuestionamientos surgen de la imperante necesidad de recordar que el agua es elemental para toda forma de vida en nuestro planeta (Barreda, 2006; Delgado, 2005; Shiva, 2013). A pesar de ello, en las últimas décadas la crisis que enfrentamos como especie, radica en gran medida en los intentos cada vez más contundentes por gobernar el agua, sin respeto al ciclo hidrológico como “el máximo proceso de la naturaleza que permite la circulación del agua en la tierra” (Nebel, y Wright, 1999, p. 254). Es decir, se lleva agua de un territorio a otro con tecnología agresiva (represas y trasvases), se genera energía a través de las hidroeléctricas, se incrementan los costos para abastecer de agua a las ciudades (mercado del agua) y se han diversifican sus usos: industrial, minero, agropecuario, turístico y el humano; por mencionar algunos (Delgado, 2006; Illich, 2008).

Por ello, hablar de una crisis del agua requiere de una profunda revisión y reflexión, ya que desde la

economía política se enuncia que AL enfrenta la abundancia en medio de la escasez mundial del agua (BID, 2017). Es decir, AL es abundante en agua, pero padece un entorno de escasez de agua dadas las condiciones económicas del mercado. Pues si bien la densidad poblacional en las grandes ciudades latinoamericanas, rebasa por mucho a las políticas de desarrollo urbano y metropolitano, no es esta la única condición que ha llevado al borde de la crisis del agua en las ciudades. Por lo anterior, reconocemos un argumento continuo a través del cual en términos económicos y políticos, se expresa la crisis del agua: la escasez. Dicho enunciado es la premisa de investigación que se discutirá a lo largo de este documento.

## **2. Materiales y Métodos**

Para llevar a cabo esta investigación, se propuso un método mixto a partir de las ciencias ambientales que permite abordar diversas técnicas transdisciplinarias que lograron construir una investigación de esta índole, basada en el análisis teórico y discursivo de la escasez del agua. Por otro lado el análisis de los estudios de caso, se estableció a través de la investigación-acción, puesto que en términos sociales dicho método da cuenta de los fenómenos sociales en relación con el agua. Esto devela la crisis del agua en las ciudades más allá del

discurso abundancia-escasez del agua y de otros bienes naturales. Para ello se estructuraron las siguientes fases de investigación:

Fase 1. Análisis crítico del discurso<sup>15</sup> de escasez del agua. En esta fase se consideraron los elementos teóricos sobre la escasez que se documentaron a través dos discursos de sobre la escasez del agua, el primero desde el planteamiento de la economía política del agua (Delgado, 2016; ONU, 2018; Ostrom, 2010; PNH, 2014); y el segundo, un contradiscurso<sup>16</sup> de la escasez desde la ecología política (Alimonda; 2011; Bartra, 2010; Illich, 2015; Shiva, 2013; Navarro, 2016; Rojas, 2015). Este análisis deja ver la importancia del manejo economicista del agua en las políticas públicas. Por otro lado, el análisis del discurso de escasez permite una crítica desde la ecología política que devela la existencia de contradiscursos y de formas autónomas

---

<sup>15</sup> El análisis crítico del discurso se propone a investigar de forma crítica la desigualdad social tal como viene expresada, señalada, constituida, legitimada, etc., por los usos del lenguaje (es decir en el discurso). Es “el estudio crítico de la reproducción discursiva de la dominación en la sociedad” (Van Dijk, 2003, p. 151).

<sup>16</sup> En este sentido el análisis crítico del discurso no sólo estudia las formas en que el discurso contribuye a sostener las relaciones de dominación, sino también el modo en que a través del discurso se abren posibilidades de resistencia: contradiscursos, discursos alternativos (Van Dijk, 2003); ante los contextos políticos ambientales hegemónicos, como es el caso de esta investigación.

de manejo del agua, distintas a las establecidas por el modelo económico neoliberal.

Fase 2. Análisis de las categorías de abasto de agua potable y saneamiento, sobreexplotación y contaminación. Se consideraron estas categorías para el análisis de datos de América Latina y México, debido a su importancia para la vida y funcionamiento de las ciudades. Los datos se obtuvieron de instituciones como la ONU, SEMARNAT, así como de investigadores de reconocidas universidades en México.

Fase 3. Resultados y discusión. En esta fase se consideró la discusión y debate sobre los discursos de escasez y los datos obtenidos para las categorías de análisis propuestas en la fase anterior. Para referirnos a las conclusiones y como aportación desde la ecología política, planteamos el caso de la Escuelita del Agua en el municipio de Tecámac, Estado de México; como un contradiscurso que plantea que el agua es un bien natural elemental para toda forma de vida y que su acceso debe privilegiarse para el consumo humano y su permanencia en los ecosistemas.

### **3. Resultados y discusión**

En este apartado se presentan los resultados y la discusión de las consideraciones teóricas sobre la escasez del agua. Algunos estudiosos del agua como Shiva y Bartra, ponen en el centro de la discusión la escasez del agua (y otros bienes naturales), como el discurso continuo para la mercantilización de la naturaleza. Según Shiva, “la crisis del agua se explica mediante dos paradigmas contradictorios: el paradigma de mercado y el paradigma ecológico” (Shiva, 2013, p. 30).

Para comprender este apartado teórico consideramos el análisis y el diálogo de dos propuestas teóricas en torno a la escasez. La primera tiene que ver con la discusión del discurso económico de la escasez de los “recursos naturales”, en este caso del agua. Para ello se enunciarán las condiciones que plantea el Banco Interamericano del Desarrollo al respecto de la economía del agua. La segunda propuesta parte de la crítica de la ecología política, que plantea el paradigma de escasez como un discurso economista que justifica su crisis y privatización. Esta discusión es elemental, empero la problemática mundial de desigualdad en la dotación de agua para el consumo humano y la constante devastación de regiones geográficas con abundancia de agua.

### *3.1. El discurso económico de la escasez del agua*

Para organizaciones internacionales como el Banco Mundial, Banco Interamericano para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas, Organización Mundial de la Salud; por mencionar algunos, el agua es considerada en el sistema económico como un recurso estratégico, esencial para la vida y la “geopolítica y geoeconomía de los países”<sup>17</sup>, con lo que se considera al agua un asunto de seguridad nacional (Delgado, 2006; PNH, 2014).

El discurso de la escasez, tomó fuerza después de la Segunda Guerra Mundial<sup>18</sup> ante la embestida del modelo de desarrollo hegemónico que busca el incremento de la producción y el consumo para el crecimiento económico global. Con ello, en términos económicos todo se convierte en mercancía y se insta un sistema económico, político y legal, para construir la tesis central de la escasez como el origen de las múltiples crisis ambientales que afectan

---

<sup>17</sup> Aquí nos referimos a la política económica del agua que impulsa el neoliberalismo.

<sup>18</sup> El crecimiento económico en este periodo es impulsado por Estados Unidos. En teoría al generar crecimiento económico traería desarrollo a todos los países del mundo. Bajo esta premisa, la idea de países desarrollados y subdesarrollados permitió al modelo económico hegemónico la entrada del libre comercio. Éste incluye la mercantilización e intercambio de los bienes naturales de una geografía a otra.

nuestro planeta. Este planteamiento economicista es discutido por la ecología política.

Es justo en ese marco de la globalización que el agua que esté sujeta a las leyes del mercado del modelo neoliberal. Por ello, se clasifica la escasez en escasez física del agua y escasez económica del agua. La primera entendida como las condiciones naturales de disponibilidad de agua, que se debe particularmente a la cuestión geográfica de los territorios (zonas áridas y/o desiertos). En este sentido, se evidencian algunas de condiciones de escasez física del agua para AL y México en la primera parte de esta investigación.

La escasez de agua por agentes físicos ocurre cuando la demanda del agua en una región excede del suministro debido a la disponibilidad física limitada, y la escasez por agentes económicos sucede cuando el suministro es bajo debido a unas inadecuadas prácticas en la gestión del agua, que puede ser a causa de la falta de financiación de recursos (ONU, 2018). La segunda clasificación es la escasez económica del agua. El argumento central de este discurso, es abordado por Shiva (2013, p. 31) que explica que “el mercado considera la escasez del agua como una crisis derivada de que no se comercia con el agua, por lo que si ésta pudiera trasladarse y distribuirse libremente en los mercados libres, se

transferiría a las regiones de escasez y el alza de los precios conduciría a la conservación”.

La escasez, tiene que ver con su valorización mercantil, pues “cuando la escasez se presenta en el contexto capitalista, se produce la renta<sup>19</sup>” (Bartra, 2010, p. 34). La perspectiva de la escasez parte de la necesidad de satisfacer la demanda humana a favor del sistema capitalista de producción (Rojas, 2015). Este dilema se abordó por Hardin en *La tragedia de los bienes comunes* cuya tesis expresa que la condición de escasez justifica la apropiación de los bienes comunes o recursos de uso común (RUC), modificando su estatus a bienes privados (Ostrom, 2010). Sin embargo, Ostrom pone en tela de juicio las aseveraciones sobre la privatización de los bienes comunes, enunciando diversos casos de gestión colectiva de los bienes naturales (Navarro, 2016). Esto último es el punto de partida de la ecología política.

### *3.2. La escasez del agua, una crítica desde la ecología política*

La ecología política aborda desde una perspectiva crítica del discurso de escasez del agua, con ello

---

<sup>19</sup> Según Armando Bartra (2010) la renta es la forma que adopta en el mercado el beneficio económico que genera, en el capitalismo, el empleo productivo de un bien natural en condición de escasez (33).



cuestiona que el agua es una mercancía más en el sistema económico mundial y que indispensable para fines de la acumulación del capital<sup>20</sup>. Con lo que propone rescatar la relación agua-sociedad-naturaleza, en un diálogo político.

Para pensar la escasez del agua a partir de la ecología política, retomamos a Illich (2015, p. 482), que plantea que la escasez del agua puede explicarse con un ejemplo breve: en una ciudad de millones de habitantes ubicada en una región abundante en lluvias durante todo el año, se toma la decisión ante una supuesta escasez del agua de llevar a cabo un proyecto ingenieril para extraer mayor cantidad de agua de otras fuentes y distribuirla entre sus habitantes. En lugar de racionar el uso de agua en tinas y piscinas<sup>21</sup>. La escasez del agua desde esta perspectiva, no es un asunto de la naturaleza; es un

---

<sup>20</sup> Es a partir de esta premisa que Iván Illich (2008) cuestiona la relación asimétrica entre el capitalismo y el crecimiento. Lo que explica la relación estrecha que la ecología comparte la idea de reducir o detener el crecimiento económico o también llamado decrecimiento, como una forma de acción social y política que cuestiona entonces el “imaginario capitalista” que domina el planeta (Valencia, 2014).

<sup>21</sup> En este sentido, el agua no se considera primordial para la vida. Más bien, la escasez económica del agua la establece en un esquema de un bien de lujo (Rojas, 2015).

asunto económico que requiere satisfacer una demanda generadora de escasez<sup>22</sup> (Rojas, 2015).

Es desde este punto, que la justificación del desarrollo, “ha tenido los mismos efectos en todas las sociedades: se han visto atrapadas en la dependencia de las mercancías. Para satisfacer esta dependencia se tiene que seguir produciendo más de lo mismo: bienes y servicios, estandarizados y destinados a los consumidores” (Illich, 2015, p. 483). Es decir, se reduce el contacto social con el agua, a su forma de consumo. Con ello se ha generado un gran mercado de aguas, particularmente de agua embotellada; además de grandes obras hidráulicas que buscan el abastecimiento de agua a las ciudades (Shiva, 2013).

Empero el discurso de escasez del agua, devela la necesidad del modelo neoliberal de producir a un ritmo vertiginoso, muestra de ello es la intervención tecnológica cada vez más devastadora en territorios abundantes de agua. Es en este sentido que ecología política<sup>23</sup> como una propuesta teórica pone énfasis

---

<sup>22</sup> Los esquemas tradicionales del agua (como asambleas, comités comunitarios, tequios y ceremoniales) permiten la continuidad de las relaciones sociales en las comunidades, así como su relación colectiva con el agua. Mientras que en la economía son considerados sujetos de consumo.

<sup>23</sup> La Ecología Política de América Latina desde su emergencia se viene constituyendo en una relación activa de permanente intercambio y retroalimentación con los muy diversos movimientos y luchas que protagonizan conflictos en

en el asunto político, en la discusión de la cuestión económica y ambiental (Alimonda, 2011). Esto supone la crítica al modelo de desarrollo hegemónico<sup>24</sup>, en busca alternativas teóricas y políticas para el análisis crítico ante la devastación socioambiental (Alimonda *et al.*, 2017).

El discurso de escasez del agua se fortalece de la relación indisoluble sociedad naturaleza, y aprovecha este vínculo natural, para trastocar su potencial de lo común, entre las fronteras de “un bien natural público y un bien privado” (Delgado, 2006, p. 11). De este modo, el poder comunitario del agua, se transforma por el mercado en “un bien de consumo cada vez más artificialmente escaso y objeto de consumo, cada vez más al servicio y control de los consumidores” (Barreda, 2006, p. 253). Sin embargo, en la realidad la valorización del agua ha conducido a un panorama de conflictos socioambientales, devastación, enfermedad, muerte

---

diferentes escalas y circunstancias, recogiendo las críticas a los modelos de desarrollo de vigencia hegemónica y delineando con ellos otros futuros posibles (Alimonda, *et. al.*, 2017, p. 18).

<sup>24</sup> Nos referimos al neoliberalismo como modelo de desarrollo hegemónico que ha impulsado el discurso del desarrollo sustentable, cuestión que implica una disyuntiva del agotamiento de los bienes comunes necesarios para reproducción del capitalismo, transformándolos en mercancías, ante la necesidad imperante de mantener la vida humana y su estrecha relación con la naturaleza (León, 2016; Moysés, 2012).

y guerra (Delgado, 2006; Navarro, 2016; Shiva, 2013). Por tanto, el discurso de la escasez económica del agua ha motivado su mercantilización, desencadenando la crisis del agua a escala planetaria, pero la contradicción de la abundancia y la escasez nos permiten observar la limitación en el acceso en el agua en las ciudades latinas, además de la profunda crisis ambiental que esto ha desencadenado.

La ciudad de Sao Paulo en Brasil, es una de las ciudades latina con mayor densidad poblacional. Esto significa que hay que abastecer a una extensa población de agua, además de ofrecer el servicio de saneamiento. Pese a que Brasil cuenta con el 20% de agua en el mundo, además de bosques y ríos caudalosos, la ciudad de Sao Paulo enfrenta severos problemas de escasez del agua. La industrialización, la generación de hidroelectricidad y la urbanización acelerada en las favelas, han provocado que las fuentes de agua no sean seguras, generando un mercado ilegal de aguas para su extracción y distribución. El agua que antes abastecía a comunidades enteras, ahora es desviada a presas y trasvases. Al respecto, diversos movimientos ambientalistas se han manifestado para exigir agua

en sus territorios como es el caso del “Movimiento sin tierra en Brasil” (MST)<sup>25</sup>.

Otro caso similar, es el de la ciudad de Antioquía en Colombia. Al igual que Brasil, Colombia es uno de los países de AL con alta disponibilidad de agua en su territorio. No obstante, esto no impide que padezca los efectos de la escasez del agua. En la región de Antioquia la falta de agua ha desencadenado uno de los movimientos más emblemáticos de AL en defensa del agua, el territorio y son afectados por las represas, llamado “Ríos Vivos”<sup>26</sup>. El agua que es distribuida por empresas “sociales” en Antioquía, se encuentra en constante competencia con las industrias transnacionales, particularmente con las mineras que buscan abastecerse de agua, generando represas y perforando pozos para garantizar su proceso productivo. Dicha condición, nos permite ver la generación de la escasez frente a los contextos de agua abundante.

---

<sup>25</sup> Para conocer más sobre el MST, se recomienda la lectura de la información disponible en:  
*[fundacionbetiko.org/wp-content/uploads/2012/11/MST.pdf](http://fundacionbetiko.org/wp-content/uploads/2012/11/MST.pdf)*

<sup>26</sup> Para mayor información se recomienda la consulta del siguiente link: <https://riosvivosantioquia.org/>

### *3.3. Análisis de datos sobre la escasez del agua en América Latina y México: abasto de agua potable y saneamiento, sobreexplotación y contaminación*

Para contextualizar la situación actual de la escasez del agua, se recopilaron los datos más significativos con respecto a la situación de AL y México, considerando los aspectos de acceso al agua potable, saneamiento, contaminación y sobreexplotación. Esto con la finalidad de enunciar la problemática del agua que se comparte en dichos territorios.

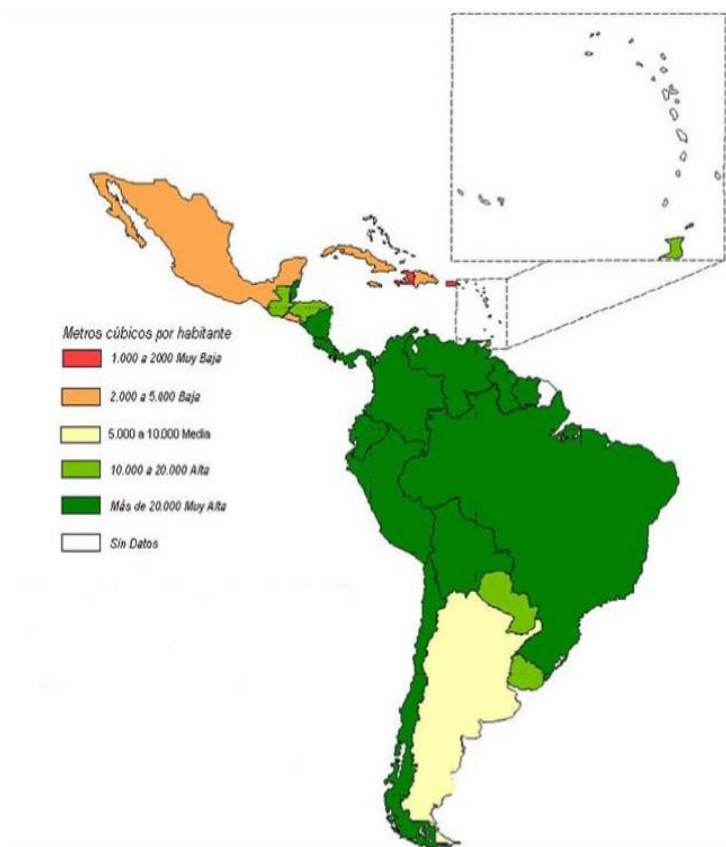
Al abordar esta investigación en términos teóricos, se continuará con la discusión del discurso económico de la “escasez” y su crítica desde la ecología política: El primero como un discurso generado por la teoría económica del modelo neoliberal, que a partir de las consideraciones de la oferta y la demanda expresa la escasez del agua (y de los bienes naturales) como un asunto mercantil. Desde esta perspectiva de abordar la escasez, se enuncian la escasez física del agua y la escasez económica del agua.

El segundo aspecto tiene que ver con la crítica al discurso de escasez como detonador de la crisis del agua en AL. Es decir, la ecología política permite develar las profundas contradicciones de una Latinoamérica que padece la relación abundancia-escasez.

### 3.3.1. Abasto de agua potable y saneamiento en América Latina

Pese que las políticas ambientales como los objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) establecieron dentro de su objetivo 7: garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, y como meta ampliar el abasto de agua potable y saneamiento en el periodo 2005-2015, los alcances no son los esperados (FAO, 2017).

Al respecto, 1 de cada 4 habitantes en América Latina no cuenta con acceso a agua potable(Figura 1) ni a servicios de saneamiento (OMS, 2019). Tal condición incluso se ve rebasada por la cantidad y calidad de agua que reciben los latinoamericanos en sus hogares, y por otro lado, sobre los deficientes o nulos procesos de tratamiento. Ello impide que el agua pueda retornar a los ecosistemas para continuar con su ciclo natural. Lo que trae implicaciones para la salud local y ecosistémica, pues provoca escenarios de escasez del agua para consumo humano y devastación ambiental. En apartados siguientes se profundizará sobre este asunto.



Fuente: TLA, 2018

Figura 1. Disponibilidad de Agua en América Latina



### 3.3.2. Contaminación del agua en América Latina

La contaminación del agua<sup>27</sup> en América Latina es una de las problemáticas más alarmantes en términos sociales, políticos y económicos. Si bien, el modelo neoliberal ha acelerado la capacidad extractiva del agua y su contaminación industrial, las aguas residuales urbanas forman parte significativa del problema.

Estos datos son alarmantes, se dice que el 25 millones de latinoamericanos se encuentra en contacto directo con agua contaminada por la urbanización y el 25% de los ríos de la región se encuentran severamente contaminados (ONU, 2018). Lo que muestra que más del 86% de las aguas residuales urbanas se descarguen en los cuerpos de agua sin tratamiento alguno, es importante mencionar que el 90% del agua es destinada a usos industriales o agrícolas (TLA, 2018), empero la distribución del agua potable para consumo humano no es primordial.

---

<sup>27</sup> El agua contaminada es aquella que contiene materiales que la hacen inadecuada para determinados usos (Nebely Wright, 1999). En este sentido nos referimos a contaminación del agua a la alteración de las propiedades químicas del agua, que impiden su consumo humano.

### 3.3.3. Sobreexplotación del agua en América Latina

A partir de los años 50, la tecnología ha permitido extraer agua y almacenarla en grandes represas y trasvases. El modelo neoliberal desencadenó una economía del desarrollo, basado en el incremento de la producción, extracción de “recursos naturales” como materia prima y generación de crecimiento económico (Mora, 2006); que nos han conducido entre otras cosas, a la sobreexplotación de los mantos acuíferos<sup>28</sup>. Pareciera que para la economía no es suficiente el abasto de agua de los ríos, lagunas, manantiales. Por tanto, se justifica la intervención en el agua subterránea.

Sin embargo, es importante hacer una distinción al respecto, en países como México o Argentina, el abasto de agua para consumo humano depende de las aguas subterráneas. A diferencia de Colombia que puede dar agua a sus habitantes, en su mayoría a través del manejo de los ríos.

---

<sup>28</sup> Se dice hay sobreexplotación de los mantos freáticos cuando la extracción del agua rebasa la capacidad de infiltración o recuperación natural de la cantidad de agua que posee un acuífero (Nebel y Wright: 1999).

### *3.4. Datos sobre la escasez del agua en México*

México posee características geográficas muy particulares. Al norte del país posee grandes zonas semidesérticas, y en la zona central y al sur del país, se encuentran las mayores reservas de agua. Es desde este argumento que la escasez de agua en México se comprende como un asunto de distribución de agua, en términos geográficos. Por ejemplo, las ciudades más pobladas son la Ciudad de México y su área metropolitana<sup>29</sup>, Guadalajara y Monterrey; son las más susceptibles a padecer una crisis por agua (Figura 2).

Por otro lado la polémica sobre la escasez de agua en México hace énfasis sobre el asunto demográfico y el desarrollo urbano, puesto que en el periodo de 1950 al 2015 la población urbana se cuadruplicó (INEGI, 2015). Al respecto, el crecimiento de las ciudades a un ritmo exponencial supone un reto para la administración pública en cuanto a su incapacidad de distribuir el agua a nuevos territorios.

La política ambiental y en materia hídrica en México, coincide en la necesidad de homologar

---

<sup>29</sup> Dicha región se considera la más densamente poblada de México, lo cual incorpora a la Ciudad de México y la Zona Metropolitana del Valle de México. La ciudad ha crecido más allá de los límites territoriales de la su jurisdicción y muestra continuidad urbana con el Estado de México.

criterios en términos de gestión hídrica. Esto quiere decir, que “la política hídrica nacional ha respondido, desde principios del siglo XX, a las demandas de la sociedad con una gestión de la oferta de agua, enfocada al desarrollo socioeconómico, mediante la construcción de infraestructura hidráulica diversa: presas, acueductos, pozos y sistemas de suministro de agua potable y riego agrícola, entre otras” (PNH, 2014).

Los datos de disponibilidad del agua en México, dejan ver las condiciones vulnerables en las que más de 35 millones de mexicanos que se encuentran en situación de baja disponibilidad de agua en términos de calidad y cantidad (Conagua, 2018; PNH, 2014). Sin embargo, una vez más pareciera que la escasez del agua en es un asunto económico. Pues contradictoriamente en México, los estados con mayor disponibilidad de agua son los que generan menos aportaciones al Producto Interno Bruto<sup>30</sup> (Conagua, 2018). No obstante, no podemos perder de vista que el crecimiento urbano ha detonado una problemática común de escasez del agua, debido al establecimiento de un mercado del agua y también

---

<sup>30</sup> Aquí se muestra la contradicción económica de la escasez del agua, pues en el Norte y Centro de México hay mayor desarrollo económico, pero menor disponibilidad de agua por habitante. Mientras que en la región sur con menor desarrollo económico, es una de las regiones a nivel mundial con mayor disponibilidad de agua por habitante.

ha traído consigo diversas problemáticas como la contaminación del agua y la sobreexplotación de mantos acuíferos.



Fuente: Conagua, 2018

Figura 2. Principales ciudades de México y sus Zonas Metropolitanas

### 3.4.1. Abasto de agua potable y saneamiento en México

Según datos del INEGI, “más 44 millones de mexicanos no tienen una dotación de agua al día, es decir, sólo el 68% cuenta con agua de forma continua, mientras que más de 10 millones de habitantes padecen suministro de agua potable irregular” (INEGI, 2015). Estas cifras permiten observar el problema de distribución del agua, pues no basta contar con la red de agua potable si no se

garantiza el acceso suficiente para el consumo humano. Por otro lado, en México el 71% de la población urbana cuenta con el servicio de saneamiento, no obstante en condiciones rurales se carece del mismo. Esta situación es agravante ya que el tratamiento y disposición de los residuos fecales son mínimos, y se conducen a otros cuerpos de agua o se infiltran al subsuelo.

Los datos a nivel internacional muestran algunas incongruencias pues establece que la disponibilidad de agua por habitante al año es suficiente si se dotan de al menos 1 500 m<sup>3</sup> por habitante al año (ONU, 2018). En estos términos México posee de una alta disponibilidad de agua puesto que para el año 2015 se calculó que la cantidad de agua es de 3 692 m<sup>3</sup> por habitante al año. (Conagua, 2018). Existe disponibilidad de agua pero no se garantiza su distribución a toda la población.

Por otro lado, es importante mencionar que algunas de las políticas hídricas que se ejecutan para mitigar el acceso al agua potable en para el consumo humano en las ciudades mexicanas, se encuentran el tandeo de agua y la distribución con pipas. Sin embargo, dichos esquemas son insuficientes para garantizar el abasto de agua en términos del derecho humano al agua y al saneamiento<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> El derecho humano al agua y al saneamiento se estableció el 20 de julio de 2010 a través de la Resolución 64/292 de la Asamblea

### 3.4.2. Contaminación del agua en México

Uno de los problemas ambientales más severos que afecta nuestro país, es la contaminación del agua. Este escenario es visible al transitar por el territorio nacional. Más del 75% de los ríos del país se encuentran severamente contaminados, entre los casos más severos se localizan el río Atoyac, Lerma, Santiago, Coatzacoalcos y el río Tula; entre otros (Arellano, 2018). Al respecto se han identificado más de mil contaminantes en los cuerpos de agua. Los contaminantes van desde desechos domésticos y plásticos, y sustancias de compuestos químicos como el tolueno, hexano, hexaclorobenceno, hidrocarburos, aceites, tintas y residuos farmacéuticos<sup>32</sup> (Arellano, 2018; Jiménez 2007).

La cantidad de contaminantes en el agua impide que toda forma de vida se desarrolle en ella y dificulta sus procesos de tratamiento

---

General de las Naciones Unidas. Por tanto los Estados deberán de proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento, limpio, accesible y asequible. En México, el derecho humano al agua, se establece en la reforma al artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada el 8 de febrero de 2012, toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. También establece la participación de los tres órdenes de gobierno y la sociedad misma para garantizar este derecho.

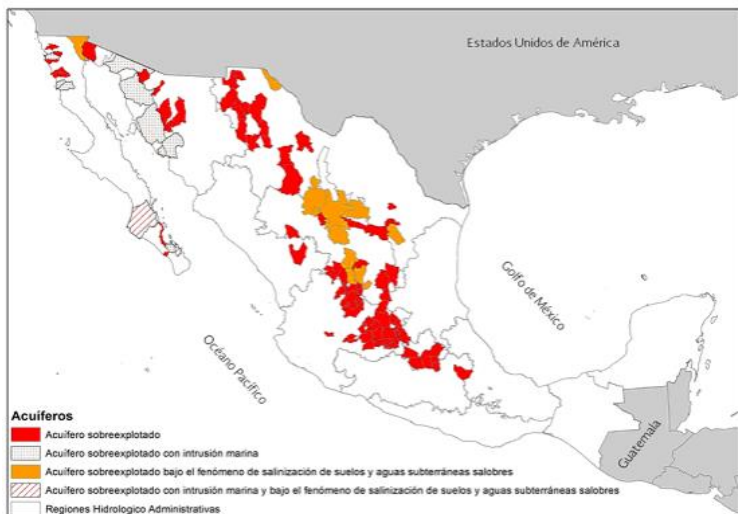
<sup>32</sup> Estos contaminantes se vierten por las empresas textiles, químicas y farmacéuticas. Se requiere de tratamientos para el agua de alto costo y de procesos muy específicos para su depuración.

(Arellano, 2018). Esta condición no sólo limitara en un futuro cercano la disponibilidad de agua, también implica una devastación ambiental en términos de la alteración de la flora y fauna de los ecosistemas mexicanos.

### 3.4.3. Sobreexplotación de mantos acuíferos en México

En México la sobreexplotación de los mantos acuíferos se ha incrementado en los últimos 50 años, esto con motivo del desarrollo industrial y el crecimiento de las ciudades (Figura 3). Según datos de la Comisión Nacional del Agua, México posee 653 acuíferos, que satisfacen la demanda de agua para uso industrial y para los habitantes de las ciudades más densamente pobladas. Se han identificado más de 103 acuíferos sobreexplotados (Conagua, 2018).





Fuente: Conagua, 2018

Figura 3. Acuíferos sobreexplotados en México

Al analizar la figura 2 y la figura 3, se puede observar la relación directa que existe entre la sobreexplotación de acuíferos y el desarrollo urbano, pero también se visibiliza que el agua en las ciudades más pobladas de México tiene un uso preferentemente industrial, en particular para el norte y el centro del país (ver figura 4).



Fuente: SEMARNAT, 2018

Figura 4. Corredores industriales y fuentes de contaminación

#### 4. Conclusiones

Las ciudades son más sensibles a los cambios estructurales que sugiere la economía política para garantizar el capital. La razón es simple: En las ciudades prevalece una incapacidad social para abastecerse de agua y alimentos. En lo rural y la periferia de las ciudades, las comunidades aún poseen conocimientos y espacios naturales que les permiten hidratarse, alimentarse y sanarse. La acumulación es el objeto de las ciudades, en tanto la población ya no se ocupa de sembrar y regar

cultivos, o de generar formas para llevar el agua hasta sus casas. Estas acciones, se han transformado en bienes y servicios que se demandan bajo el derecho a la ciudad (Harvey, 2013). En las ciudades se deja en manos de las Instituciones Estatales (ya sean públicas, municipales o privadas), el abasto, distribución, potabilización y tratamiento del agua.

El discurso de la escasez, bajo su planteamiento desde la economía política, muestra una serie de contradicciones con respecto a que América Latina comparte la abundancia del agua, según los datos que se observan en la primera parte de este documento más del 33% de las reservas de agua del mundo se encuentran aquí (ver Figura 1). La disponibilidad de agua por habitante es de más de 3100 m<sup>3</sup>, que es el doble de lo del promedio per cápita a nivel mundial (TLA, 2018). Ante ello el capital observa la abundancia de agua y tierra fértil, como una oportunidad para la acumulación. Es por ello que se pretende a través de diversas estrategias, modificar las formas de propiedad del agua.

Sin embargo, la escasez del agua, en América Latina se ha acentuado particularmente en las grandes ciudades con motivo de la capacidad distributiva entre las regiones urbanas y rurales. Además de los problemas acceso al agua potable y

saneamiento<sup>33</sup>, contaminación y sobreexplotación de agua subterránea.

Una de las posturas de la ecología política que recuperamos para discutir la crisis del agua en las ciudades, es el papel del capital y su economía como el generador de las crisis (no sólo de la crisis del agua) si no de las múltiples crisis de la humanidad (Bartra, 2014; Illich, 2008).

El asunto de la crisis del agua en las ciudades, supone un paradigma económico ambiental de “privatización de las ganancias y socialización de los costos” (Delgado, 2006: 19). Esto justifica la intervención en las formas en que los habitantes de las ciudades se abastecen del agua. Hasta hace menos de 50 años, esta dotación particularmente en las ciudades de AL, se llevaba a cabo a través de las relaciones sociales, es decir, por sistemas ancestrales que permitían la interacción sociedad-naturaleza, en tanto se procuraba la reproducción de la vida. Esta forma de abasto de agua como un común<sup>34</sup>, coexiste

---

<sup>33</sup> El saneamiento es el tratamiento o disposición de las excretas y las aguas residuales producidas en casa habitación a través de sistemas de letrinas, conexión de sistemas sépticos, drenajes, sistemas sanitarios, entre otros (OMS, 2019).

<sup>34</sup> A diferencia de la racionalidad que busca maximizar las utilidades para beneficio individual desde la lógica de la competencia y la negación del otro; la producción de lo común parte de un sentido de interdependencia basado en la cooperación social y la complementariedad con la naturaleza (Navarro, 2016).

en aras de la mercantilización. Esta es la condición actual de la crisis de agua en las ciudades.

Si bien, muchas comunidades urbanas, periurbanas y rurales, en diversos puntos de AL aún poseen autonomía en el manejo del agua de sus territorios. El libre mercado intenta a través de mecanismos diversos los derechos de propiedad, los mercados del agua, la distribución del agua (focalizando el consumo de agua en las ciudades). Además privilegia en todo momento los usos del agua para las actividades productivas de agricultura, ganadería extensiva y la industria (Delgado, 2006).

La presión que ejerce el capital para apropiarse de la naturaleza, es cada vez más rapaz y violenta, valiéndose del discurso de la escasez de agua. “Esta rapacidad se origina en la codicia del gran dinero pero también en que al no tratarse de mercancías en sentido estricto sino de bienes naturales-sociales el mercado no castiga directa e inmediatamente a quien saliniza los suelos, contamina las aguas, tala los bosques, destruye manglares, aniquila fauna y flora, arrasa comunidades o destruye culturas” (Bartra, 2014).

El crecimiento de las ciudades convierte a las comunidades en consumidores que demandan agua y servicios de saneamiento. Es decir, no importan los costos sociales y ambientales para llevar agua de otros territorios a las ciudades, mientras se logre

satisfacer la demanda. En este sentido, la escala de la devastación ambiental de la extracción del agua, el entubamiento de los ríos o la contaminación del agua, será mitigado por los principios precautorios y como “el que contamina paga” (Cepal, 2001). De tal manera que la contaminación del agua, es parte de la crisis que genera el capital.

En el nodo de la crisis del agua en las ciudades también incluye a “los despilfarradores consumos de ciertos asentamientos humanos y modos de producción” (Delgado, 2006, p. 24). La contradicción constante entre abundancia y escasez de agua, se intensifica debido a la contaminación (irreversible), el calentamiento global y el crecimiento poblacional de las ciudades. “La crisis del agua es una crisis ecológica con causas comerciales pero sin soluciones de mercado” (Shiva, 2013).

A pesar de que a nivel internacional la ONU reconoce que la crisis del agua no es sólo un asunto económico, los planteamientos para la mitigación de la misma, siempre recaen en la generación de políticas ambientales hídricas, de origen economicista. “La escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano. Hay suficiente agua potable en el planeta para abastecer a los 7.000 millones de personas que lo habitamos, pero ésta está distribuida

de forma irregular, se desperdicia, está contaminada y se gestiona de forma insostenible” (ONU, 2018). Esto se observa en “creciente tendencia a privatizar y desnacionalizar los recursos naturales” (Delgado, 2006, p. 19). Ya que, las soluciones a la problemática del agua, están dictadas por el mercado, destruyen la naturaleza y agravan la desigualdad (Shiva, 2013).

*El contradiscurso: La escuelita del agua, una oportunidad en la ciudad de generar abundancia en la escasez*

La relación agua-sociedad aún permite crear de manera autónoma formas para distribuir agua en comunidades enteras. Desde la ciudades, el agua retoma su naturaleza comunitaria o de bien común urbano (Harvey, 2013). Estas formas se reconocen colectivas y comunes. Para mostrar estos escenarios, nos permitiremos enunciar la experiencia de “la escuelita del agua”, como una resistencia alternativa al modelo hegemónico. En tanto también los habitantes de esta región han generado un contradiscurso desde la crítica discursiva a la escasez del agua en México.

La escuelita del agua, es un proyecto autónomo que se lleva a cabo por el Sistema de Agua Potable de Tecámac Edo. De Méx. A. C., en el Municipio de

Tecamac<sup>35</sup>. Este proyecto está dirigido a los comités comunitarios del agua y a la población que busque soluciones a las problemáticas compartidas de la gestión del agua. La escasez del agua en esta región de la ciudad tiene que ver con el crecimiento inmobiliario<sup>36</sup> desmedido, que ha cercado las fuentes de agua con la imposición y creación de nuevos centros urbanos<sup>37</sup>. Lo que dificulta la administración del agua en términos comunitarios. Es decir, se puede dotar al pueblo bajo usos y costumbres, pero para garantizar el acceso al agua en los nuevos fraccionamientos el gobierno municipal se ha apropiado de las fuentes de agua cercanas.

---

<sup>35</sup> La escuelita del agua ha generado un contradiscurso de escasez del agua. Estos ciudadanos se organizaron en contra del modelo de urbanización rapaz, que es integrado por una serie de desarrollos inmobiliarios y recientemente con la ampliación del aeropuerto de Santa Lucía. En esta región los pueblos originarios han realizado una administración del agua autónoma, que se pone en riesgo a partir de la venta de la tierra para casas y del agua para usos distintos a los humanos, en los cuales se privilegia su uso mercantil.

<sup>36</sup> El crecimiento inmobiliario se detonó por el proyecto de ciudades bicentenario. Un proyecto del gobierno del Estado de México que buscaba orientar la demanda de viviendas de la Ciudad de México, a costos bajos (Espinosa, 2014).

<sup>37</sup> Los integrantes de la Escuelita del Agua argumentan que sufren en su territorio una urbanización salvaje. Se recomienda la revisión del video, disponible en:  
[http://132.248.14.102/static/Visualizador/Mapas\\_locales/tecamac.html](http://132.248.14.102/static/Visualizador/Mapas_locales/tecamac.html)



Otro de los problemas, son los costos que supone la extracción de agua ya que se requiere bombear agua para la población de más de 150 m de profundidad. Ello implica costos por el uso de energía eléctrica, difíciles de solventar. A pesar de los intentos por municipalizar el agua, en Tecámac el manejo del agua está en manos de la comunidad quien enfrenta una crisis del agua, motivo del contexto megalopolitano<sup>38</sup> de su municipio. En asamblea se deciden los usos del agua y se plantean las acciones colectivas para su manejo.

En un entorno generador de escasez del agua que han desencadenado las inmobiliarias<sup>39</sup>, la comunidad se encuentra activa participando en foros, asambleas, encuentros para informar y movilizar a la población en caso de que se intente municipalizar el agua. Algunas de las temáticas abordadas en la escuelita del agua, tienen que ver con la aplicación de técnicas que pueda controlar la población, lo que supone la reducción de los costos en el sistema eléctrico. La mayoría tienen que ver el tandeo oportuno del agua, la captación de agua de lluvia y sistemas de tratamiento para casa habitación. También lleva a cabo talleres de

---

<sup>38</sup> La megalópolis del centro de México se integra por el Estado de México, Puebla, Morelos, Hidalgo y la Ciudad de México. Es una de las megaciudades más grandes del mundo.

<sup>39</sup> Tecámac es el municipio con mayor desarrollo inmobiliario de América Latina (Espinosa, 2014).

contabilidad, sensibilización ambiental y de cultura del agua, entre otros.

El caso de la escuelita del agua, ha permitido un posicionamiento político de la comunidad con otras comunidades, pueblos y movimientos en defensa del agua y del territorio. Tecámac participa activamente en la generación de la propuesta de la Iniciativa Ciudadana de la Ley General de Aguas<sup>40</sup>, promovida por el movimiento nacional “Agua para Todos, agua para la vida”<sup>41</sup>.

Comités de agua de los estados de México, Ciudad de México, Puebla, Tlaxcala y Morelos, han integrado una red de comités de agua que han aprendido a caminar juntos para crear alternativas al discurso de la escasez del agua. Pues, si la escasez es física, diseñan y comparten estrategias para generar abundancia para la comunidad. Si la escasez es económica, proponen en términos políticos leyes y figuras jurídicas que permitan la reapropiación del agua. Estas son acciones que generan abundancia de agua en ciudades de escasez (Shiva, 2013).

Sin duda, este caso permite reconocer la acción política -del agua-. Lo que deja ver la necesidad de

---

<sup>40</sup> La propuesta de Iniciativa Ciudadana de la Ley de General de Aguas se encuentra disponible en:  
<http://aguaparatodos.org.mx/la-iniciativa-ciudadana-de-ley-general-de-aguas-2/>

<sup>41</sup> Para mayor información se puede revisar la siguiente dirección electrónica: <http://aguaparatodos.org.mx/>

recuperar la relación social con el agua (Barreda, 2006; Illich, 2015). Reconocer un límite infranqueable del mercantilismo absoluto en la irreductibilidad última de los ecosistemas a la condición de mercancías remite a una contradicción externa del sistema, un antagonismo que es la modalidad específicamente capitalista de una relación tan prolongada como la existencia humana: la dialéctica naturaleza-sociedad (Bartra, 2014, p. 170). Después de todo, la humanidad puede prescindir de los modos de producción, pero no del ciclo natural del agua. Éste, es el ciclo de la vida.

## Referencias

- Alimonda, H. (2011). *La naturaleza colonizada. Ecología política y minería en América Latina*, Consejo Latinoamericano de las Ciencias Sociales, Buenos Aires.
- Alimonda, H. et. Al. (2017). *Ecología Política Latinoamericana. Pensamiento crítico, diferencia latinoamericana y rearticulación epistémica*, Consejo Latinoamericano de las Ciencias Sociales, Universidad Autónoma Metropolitana, Buenos Aires.
- Arellano, O. (2018). “Contaminación del agua y sus efectos ecológicos” en *Por la soberanía del agua*,

- Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad, A. C. Tequío. Grupo para la Defensa del Patrimonio Histórico, Cultural y Natural, A. C. México.
- BID Banco Interamericano para el Desarrollo (2017). *Aguas limpias para América Latina y el Caribe*. Recuperado el 08 de noviembre de 2018, de: <https://www.iadb.org/es/sectores/agua-y-saneamiento/perspectiva-general>
- Barreda, A. (2006). *Voces del agua. Privatización o gestión colectiva: Respuestas a la crisis capitalista del agua*. Testimonios, experiencias y reflexiones, Editorial Ítaca, México
- Bartra, A. (2010). *Tomarse la libertad. La dialéctica en cuestión*, Editorial Ítaca, México
- (2014). *El hombre de hierro. Límites sociales y naturales en la perspectiva de la Gran Crisis*, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Universidad Autónoma Metropolitana. Editorial Ítaca, México.
- Cepal Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2001). *El principio precautorio en el derecho y la política internacional*. Recuperado el 01 de febrero de 2019, de: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6377-principio-precautorio-derecho-la-politica-internacional>

- Conagua Comisión Nacional del Agua (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*, Recuperado el 05 de enero de 2019, de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>
- Delgado, G. (2005). *Agua y seguridad nacional: el recurso natural frente a las guerras del futuro*, Editorial Arena Abierta, Random House Mondadori, México.
- (2006). *Agua: Usos y abusos, la hidroelectricidad en Mesoamérica*, Colección Alternativas, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- El Economista (2018) “Ciudad del Cabo, la primera gran ciudad del mundo en quedarse sin agua: se acaba en tres meses”. Recuperado el 20 de abril de 2018, de <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/8863926/01/18/Ciudad-del-Cabo-la-primera-gran-ciudad-del-mundo-en-quedarse-sin-agua-se-acaba-en-tres-meses.html>
- Espinosa, M. (2014). *Mega proyecto urbano. La ciudad Bicentenario de Tecámac, México*. Revista Bitácora Urbano Territorial, 24 (2), 31-39.

- FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2017) *Objetivos del desarrollo sostenible*. Recuperado el 11 de enero de 2019, de <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/mdg/goal-7/es/>
- Forbes México (2018). “CdMx, entre las 11 ciudades que podrían quedarse sin agua potable”. Recuperado el 28 de febrero de 2018, de <https://www.forbes.com.mx/cdmx-entre-las-11-ciudades-que-podrian-quedarse-sin-agua-potable/>
- Harvey, D. (2013). *Ciudades rebeldes. Del derecho a la ciudad a la revolución urbana*. Editorial Akal, Madrid.
- Illich, I. (2008) *Obras reunidas II*, Fondo de Cultura Económica, México.
- (2015) *Obras reunidas I*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) *Información por entidad*. Recuperado el 21 de enero de 2019, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>
- Jiménez, B. (2007) “Información y calidad del agua en México” en *Trayectorias*, IX (24), 46-54.
- León, E. (2016) *Geografía crítica, espacio, teoría social y geopolítica*. Universidad Autónoma de México, Editorial Ítaca, México.

- Mora, O. (2006). “Las Teorías del Desarrollo Económico, algunos postulados y enseñanzas” en *Apuntes del Cenes*, 26 (42), 49-74.
- Moysés, A. (2012). “La hegemonía del pensamiento neoliberal y el desarrollo sustentable” en *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona Vol. XVI, núm. 418 (60), 1 de noviembre de 2012. Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-418/sn-418-60.html>
- Navarro, M. (2016). *Hacer común contra la fragmentación en la ciudad. Experiencias de autonomía urbana*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Nebel, B. y Wright, R. (1999). *Ciencias Ambientales, ecología y desarrollo sustentable*, 6ta edición. Prentice Hall, México.
- Organización de las Naciones Unidas (2018). *Contaminación del agua en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-en-america-latina-caribe-infografia/>
- Organización Mundial de la Salud (2019). *Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud*. Recuperado el 13 de enero de 2019, de [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/mdg1/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/)

- Ostrom, E. (2010). *El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva*. Fondo de Cultura Económica, México.
- PNH Programa Nacional Hídrico (2014) *Programa Nacional Hídrico* contenido en el Plan Nacional de Desarrollo (2014-2018).
- Rojas, A. (2015). *Agua en Disputa: Territorios en urbanización y resistencia*, Tesis para obtener el grado de Maestra en Estudios para la Paz y el Desarrollo, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Semarnat Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). *Fuentes de contaminación ambiental de competencia federal*. Recuperado el 23 de mayo de 2018, de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D4\\_R\\_PROFEPA02\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D4_R_PROFEPA02_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Shiva, V. (2013). *Las Guerras del Agua, privatización, contaminación y lucro*. Siglo XXI editores, México.
- TLA Tribunal Latinoamericano del Agua (2018). *Situación hídrica en América Latina*. Recuperado el 23 de octubre de 2018, de <http://tragua.com/situacion-hidrica-en-america-latina/>



- Valencia, M. (2014). “Sobre los escombros del crecimiento emerge el decrecimiento” en *Territorios en Disputa. Despojo capitalista, luchas en defensa de los bienes comunes naturales y alternativas emancipatorias en América Latina* (397-309), Bajo Tierra Ediciones, México.
- Van Dijk, T. (2003b). La multidisciplinaridad del Análisis Crítico del Discurso: un alegato a favor de la diversidad, en *Métodos de análisis crítico del discurso* (pp. 143-177). Barcelona: Gedisa.

# EL CONSUMO DE AGUA EMBOTELLADA EN MÉXICO, UNA PROBLEMATIZACIÓN

Vanessa González Hinojosa<sup>1</sup>, Lilia Zizumbo  
Villarreal<sup>2</sup>, Emilio Gerardo Arriaga Álvarez<sup>3</sup>  
y Verónica Martínez Miranda<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). vangohi13@gmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Turismo y Gastronomía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). lzv04@yahoo.com

<sup>3</sup>Instituto de Estudios sobre la Universidad (IESU), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). egearriaga@gmail.com

<sup>4</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del agua, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). mmirandav@uaemex.mx

## 1. Introducción

México ostenta el primer<sup>42</sup> lugar en el consumo per cápita de agua embotellada a nivel mundial, lo que conlleva implicaciones fatales al ambiente y a la salud de las personas, hecho que ha motivado el

---

<sup>42</sup> El consumo de agua embotellada llegó a 234 litros por persona en el año de 2014 (Enciso, 2015). Las cifras siguen incrementándose, así como la diversificación del producto en México.

desarrollo de este capítulo de revisión, con el principal objetivo de establecer una propuesta teórica<sup>43</sup> que permita analizar qué factores y actores han incidido en la aceptación de este nuevo hábito. Así como mostrar un marco teórico referencial que se inserte en el campo interdisciplinario de diferentes ciencias, que intentan dialogar con distintos pensamientos. Es por ello que las categorías de análisis sugeridas permiten explicar el objeto de estudio de la investigación<sup>44</sup>, a partir de diversas posturas teóricas –desde el pensamiento crítico–, para posibilitar el abordaje de la problemática del consumo de agua embotellada en el país.

Para desarrollar la problematización del consumo de agua embotellada se requiere la comprensión de los actores claves que lo han

---

<sup>43</sup> Es importante aclarar, que si bien, el estudio teórico no se debe disociar del metodológico. En este capítulo de revisión se proponen sólo los elementos teóricos, para tener una mayor comprensión y entendimiento del objeto de estudio de la investigación. Por lo que el estudio metodológico queda fuera del objetivo de dicho capítulo, por la limitante del número máximo de palabras establecidas por el Libro de Tópicos en Ciencias Ambientales. No obstante, en la tesis de investigación se profundiza el estudio metodológico en el apartado del marco teórico-metodológico.

<sup>44</sup> Este capítulo de revisión es parte del producto de la tesis doctoral en curso titulada: “La historia del presente del agua embotellada, su problematización y la posibilidad de las contraconductas”.

desencadenado, además de la articulación de los mismos para estudiar la dinámica que llevan en conjunto. Se han identificado como *principales actores* al Estado, a la empresa del agua embotellada y al consumidor, éstos se interrelacionan a través de diferentes momentos agrupados por *procesos de enajenación y de alienación*. A lo largo del capítulo se irán desglosando los elementos teóricos que se retomaron, con sus referentes correspondientes, sin embargo, en síntesis, se puede mencionar que:

Los procesos de enajenación enmarcan la actuación del Estado (dentro del nuevo capitalismo) como el ejecutor de la soberanía del mercado, mediante la reconfiguración de las formas estatales de dominación y subalternidad que permiten el proceso de legitimación. El cual a su vez consiente la privatización del agua en el sentido de la pérdida del bien natural por parte de la comunidad y de las formas tradicionales de consumo que se tenían. Asimismo, el Estado a través de tecnologías de poder introyecta a la población una política de prevención al agua del grifo; hecho fundamental que genera la desconfianza en la calidad del agua suministrada. Por su parte, la empresa del agua embotellada a través de la concesión del agua y del funcionamiento de la economía de materiales, imprime la fecha de caducidad en su producto (la obsolescencia programada) y maquina una cuasi

perfecta estrategia de demanda manufacturada con la cual atemoriza, seduce y engaña al consumidor.

Los procesos de alienación están desarrollados a través de la aprehensión que el consumidor adopta de esta “realidad ajena”. En parte por la percepción que tiene respecto a la salubridad del agua del grifo (impulsada por el Estado) y por la obsolescencia percibida que recibe a través de la propaganda (generada por la empresa de agua embotellada), lo cual subsume al individuo a un modo de vida alienado al consumo. Este ciclo infinito de consumo tiene como consecuencia un daño colateral que impacta tanto al ambiente como a la salud de las personas, controlando de esta forma la reproducción de la vida. Es por ello esencial la búsqueda de alternativas domésticas de potabilización del agua que logren mitigar estos impactos adversos, y que a su vez devuelvan a la población la confianza en el agua del grifo. Este capítulo pretende contribuir tanto en el compromiso de una sociedad más informada, que sea responsable de sus propios actos y demande los derechos que le han sido arrebatados, como en la generación de conciencia ambiental/sanitaria.

Para comprender el *argumento central* que se enmarca en la propuesta teórica, se tiene que partir de la definición de la enajenación y la alienación,

ambos conceptos<sup>45</sup> dado su raíz latina derivarían de “alienare” que significa *sacar fuera*. No obstante, en su interpretación crítica tienen connotaciones diferentes, ya que la enajenación corresponde a algo que es ajeno o bien que no es propio; mientras que la alienación concierne a una estadía superior que hace que el ser humano no se exprese a sí mismo como el actor activo en su captación del mundo, ya que éste le es extraño<sup>46</sup>.

Una vez comprendida la diferencia entre ambos conceptos, se sustenta el argumento central con base en: “Con la implementación de las nuevas formas neoliberales<sup>47</sup>, el agua pasó de ser un bien común a un bien privado<sup>48</sup>, instaurándose por ende la empresa del agua embotellada<sup>49</sup>—todo ello a través de los

---

<sup>45</sup> Para sustentar ambas terminologías se retoma tanto a Fromm (2011) —en cuanto a la recopilación que hace de las nociones y retóricas que Marx sugiere de su concepción del hombre— como a Petrović (1984) —en cuanto a la definición que hace sobre la noción de alineación en el diccionario del pensamiento marxista—.

<sup>46</sup> En esta definición se infiere que la alienación corresponde a una introyección psicológica y emocional que hace actuar al individuo bajo la realidad impuesta.

<sup>47</sup> Enfatizando la ontología del capitalismo (ser económico) y la simbiosis que hace que el mercado sea un insumo del Estado.

<sup>48</sup> Aquí es donde se enajena el vital líquido y se separa de la naturaleza y del ser humano.

<sup>49</sup> Derivada de la razón instrumental —acompañada por un proceso de deshumanización—, ya que un conocimiento científico que en teoría debería ser para el beneficio de la

tipos de dominación y subalternidad—, lo cual subsume a la población a alienarse<sup>50</sup> en el consumo<sup>51</sup> de dicho producto; cuyo fin último es la acumulación de capital y el lucro”.

En seguida se muestra la Figura 1 que hace alusión a lo referido respecto al argumento central:

---

gente, se prioriza sólo a través de sus fines económicos y utilitarios.

<sup>50</sup> Es importante mencionar que el proceso de alienación e incluso el de enajenación es subjetivo, ya que se tienen que considerar las interpretaciones que existen de las propias relaciones y condiciones sociales que el individuo tenga en una situación dada, por lo que se habría de sugerir cierto tipo de gradientes. No obstante, la propia realidad en la investigación está evidenciando (en la etapa documental y de campo) el grado de enajenación y alienación que existe en la población.

<sup>51</sup> Originado en gran medida por la publicidad que emite los medios de comunicación y por lo que se ha revisado respecto a las políticas de precaución al agua del grifo que pronunció en su momento el Estado.



Figura 1. Argumento Central

Además, si se hiciera un “zoom” o acercamiento a las interacciones que generan los factores en su interrelación dentro del embudo presentado en la Figura anterior, se vislumbrarían todas las posibles ramificaciones. Ya que, para desarrollar la problematización del consumo de agua embotellada, se requiere la comprensión de los actores y factores claves que lo han desencadenado; así como de la articulación de los mismos para estudiar la dinámica que llevan en conjunto.

Es apropiado mencionar que la utilización del concepto –o noción– “*problematización*”<sup>52</sup> a la cual refiere el título propuesto para esta investigación, fue retomado de Foucault y hace alusión a repensar

<sup>52</sup> Este elemento es crucial ya que permite el desarrollo metodológico de la propuesta teórica.



y discutir todo aquello que se presenta como incuestionable o bien aporoblemático; ya que cuanto mayor sea la obviedad, mayores razones se tendrán para problematizarla, no obstante problematizar no es sólo conseguir que lo no problemático se torne problemático, sino en lograr comprender cómo y por qué algo ha adquirido su estatus de incuestionable (Restrepo, 2008).

En este sentido, “la problematización es el conjunto de las prácticas discursivas –o no discursivas– que hacen que algo entre en el campo de lo verdadero y de lo falso y lo constituye como objeto para el pensamiento y el conocimiento científico” (Foucault, 1999, p. 371; citado en Restrepo, 2008, p. 126). La problematización es concebida en un sentido histórico y conlleva un análisis crítico del pensamiento.

Para problematizar el consumo de agua embotellada, se tiene que reconstruir<sup>53</sup> la historia del presente, en tanto que se busca comprender qué factores y actores desencadenaron dicho consumo. O bien, entender por qué se abandonaron los métodos tradicionales de potabilización del agua para pasar al consumo masivo de agua embotellada; que es publicitada como “saludable”, “económica”, “de calidad” y “amigable con el ambiente”. ¿Cómo se

---

<sup>53</sup> La reconstrucción de la historia del presente del agua embotellada se desarrolla a lo largo de toda la tesis doctoral.

podría poner en tela de juicio un hecho tan incuestionable? y ¿cómo en comparación con las bebidas nocivas a la salud –como el alcohol y el refresco– se podría siquiera dudar del beneficio que el agua embotellada –en cuanto a su calidad y practicidad– trae consigo?

En el desarrollo de la problematización del objeto de estudio se han identificado como principales actores al Estado, a la Empresa del agua embotellada y al consumidor; éstos se interrelacionan a través de diferentes momentos agrupados por procesos de enajenación y de alienación. En seguida se muestra la Figura 2 que refiere a las interacciones generadas en el argumento central.

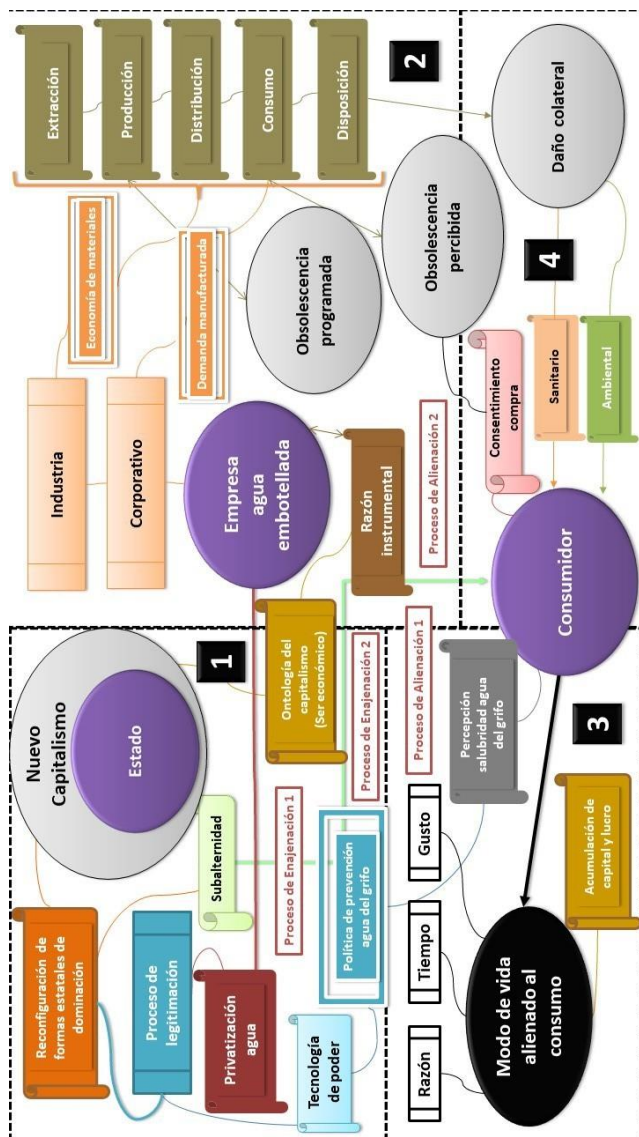


Figura 2. Acercamiento a las interacciones generadas en el Argumento Central

## **2. Propuesta Teórica/Marco Referencial**

En este apartado se describe la propuesta teórica/marco referencial, y se desarrolla con base en la explicación detallada de cada momento descrito en la Figura 2 para una mejor comprensión del argumento central.

### *2.1 El papel del Estado*

En este punto se analiza cuál es el papel del Estado en el desencadenamiento del cambio de hábito del consumo tradicional del agua, al consumo masivo industrial de la misma. Se retoma la Figura 3 para tener un mayor entendimiento del papel que conlleva el Estado en la articulación de los procesos del argumento central. Para dar sustento y soporte a dicho análisis, se focalizan diversos elementos teóricos que permiten explicar el objeto de estudio.



Figura 3. Argumento Central – Papel del Estado

Para entender la participación del Estado en el desencadenamiento del consumo de agua embotellada, se tendría que partir de la noción de la *ontología del capitalismo*; encarnizada por su ser eminentemente económico. En un tiempo líquido, el papel del Estado está determinado por medio de la *licuefacción*, que tiene por objetivo transformar lo sólido en líquido (Bauman, 2013). Y si se parte de que los sujetos son consumidores por naturaleza y que el hecho mismo de consumir es un derecho humano primordial que subyace a todos los derechos ciudadanos, el *Estado* entonces se convierte

en el *ejecutor de la soberanía del mercado*<sup>54</sup> (Bauman, 2007).

Asimismo, el Estado tiene que facilitar y asegurar todas las condiciones para que el capital pueda reproducirse. Holloway (1996) observa esta relación simbiótica capital/Estado como un proceso continuo de reificación<sup>55</sup>:

El acto (o resultado del acto) de transformar propiedades, relaciones y acciones humanas, en propiedades, relaciones y acciones de cosas producidas por el hombre, objetos que se han vuelto independientes (y que son imaginados como originalmente independientes) del hombre y gobiernan su propia existencia. También, la transformación de seres humanos en cosas que no se comportan en una forma humana sino de acuerdo con las leyes del mundo de las cosas. La reificación es un caso ‘especial’ de alienación, su forma más radical y extendida, característica de la sociedad capitalista moderna (Petrović, 1984, pp. 494-495).

Para que el Estado pueda tener este papel privilegiado en concordancia con el Nuevo capitalismo<sup>56</sup>, tendrá que *reconfigurar sus formas*

---

<sup>54</sup> Esta premisa se vislumbra con claridad en la Figura 3, en donde el Nuevo capitalismo absorbe por completo al Estado y ejerce un tipo de simbiosis entre ambos.

<sup>55</sup> También es conocida como cosificación.

<sup>56</sup> Se refiere a la trasmutación del capitalismo –posindustrial– en cuanto a su forma de acumulación, ya que ésta ahora es más

*estatales de dominación*. En primera instancia se debe comprender el *tipo de dominación*<sup>57</sup> *racional*, en donde se estipula la fe en la legalidad de ordenaciones estatuidas y de los derechos de mando de los llamados por esas ordenaciones a ejercer la autoridad; con ello se procura fomentar la creencia en su legitimidad. Esta forma de *racionalidad con arreglo a fines* permea tanto a las dimensiones socio-culturales como a las económicas-administrativas, ya que no conduce a la realización misma de la libertad universal, sino a la creación de una "*jaula de hierro*" de *racionalidad técnico-burocrática* represiva de la cual no es posible escapar (Weber, 2003). En otras palabras, el tema de la racionalidad y la dominación se perciben a través de la legitimidad<sup>58</sup> como una orientación simbólica de la acción política, en donde dicho proceso de dominación es otorgado a través de la obediencia, en virtud de un estatuto o bien una ley estipulada (Weber, 2014).

Weber (2014) introduce en su análisis del poder la perspectiva del gobernante y del súbdito, donde distingue conceptos como el *macht* (poder desnudo)

---

rápida, líquida –en cuanto a la noción del tiempo líquido, referido por Bauman (2013)–, salvaje y escurridiza.

<sup>57</sup> Se entiende como la posibilidad de hallar subordinación dentro de un grupo determinado por mandatos expresos.

<sup>58</sup> Cabe señalar que toda normatividad –en sí misma– implica actividades violentas y coercitivas.

y el *herrschaft* (forma compleja de dominación). Los individuos o grupos deben aceptar la autoridad como algo legítimo, esta última debe legalizarse a través de procesos de dominación complejos. A través del establecimiento de leyes –regulaciones, concesiones, reformas y demás estatutos regidos y emanados por el propio Estado– e instituciones que conllevan el *proceso* mismo *de legitimación* y del tipo de dominación burocrática moderna –en donde el dominado está convencido que el dominante puede ejercer sobre él–.

En consecuencia, el estudio del papel del Estado se ve fuertemente complementado por los elementos teóricos introducidos por Roux (2014), respecto al *concepto de Estado*, la *relación de mando-obediencia* y la *construcción de la hegemonía*. Si se entiende que la unidad de un cuerpo político cohesionado por lazos sagrados del que los súbditos también forman parte se podría enfatizar en que la “cabeza” de dicho cuerpo místico es la representación misma del Estado. En este sentido se percibe a modo de metáfora la alusión al “príncipe”<sup>59</sup> como un símbolo de cohesión en la comunidad estatal, lo cual logra explicar la

---

<sup>59</sup> El significado de “príncipe” refiere a la noción de soberanía, Roux (2014) enfatiza que el “príncipe” ha muerto debido a que existe un fuerte debilitamiento del contrato social. Ya que el Estado mexicano responde más a la soberanía del mercado que a la del pueblo.



ordenación política de la sociedad mexicana y hace evidente la conceptualización del Estado. Por su parte, la relación de mando-obediencia – representada por la *subalternidad*<sup>60</sup>–, está determinada a partir de la concepción del Estado –en donde este último sintetiza en el pensamiento un proceso relacional entre los seres humanos; en cuyo vínculo se fundamenta la legitimidad– lo cual forma un todo de partes involucradas que trabajan de forma dinamizada<sup>61</sup>.

Este último elemento se interrelaciona completamente con el tipo de dominación racional que plantea Weber, respecto a lo que la legalidad misma representa y en el hecho de la relación dominante-dominado. Por lo tanto, la construcción de una “nueva” hegemonía se verá edificada a partir de la noción del Estado y de la relación de mando-obediencia que los mismos súbditos del sistema político crean para sí mismos. El elemento de la subalternidad se conecta directamente con el consumidor, en la forma de subordinación<sup>62</sup> que éste le precisa al Estado. Además, de que el Estado se ve

---

<sup>60</sup> Es aquella parte constitutiva de la subordinación de clases sociales en México.

<sup>61</sup> Con base en un accionar social que se fundamenta en el diálogo.

<sup>62</sup> Es clave enfatizar que el consumidor –a través de su “voto libre”– consiente, permite o acepta en apariencia este hecho de supeditación.

obligado a cambiar sus formas estatales de dominación para adaptarse a las condiciones del Nuevo capitalismo.

Dentro de la modernidad fluida que se vive en la actualidad se sobreestima el tiempo, el espacio y la individualidad ante el sentido de comunidad, tradición y pasado. Este cambio en la relación del tiempo/espacio hace que el principal instrumento de poder y dominación sea la velocidad, en donde el límite de ésta está dado por el propio límite de la velocidad de la luz. Lo que antiguamente se entendía como “Panóptico” –ejemplificado como una cárcel en donde el prisionero desconoce cuándo es vigilado por una autoridad– hoy en día es rebasado por un nuevo concepto conocido como el *Pospanóptico*, que hace alusión a esa instantaneidad en donde la autoridad ya no hace uso implícito de su vigilancia, debido a que el propio individuo –o bien el vigilado– es quien se exhibe principalmente en el ciberespacio<sup>63</sup>, dando pauta para que se le pueda ejercer un control casi absoluto de sus movimientos (Bauman, 2013). Este elemento en concordancia con el elemento de subalternidad (relación mando-obediencia) que introduce Roux (2014), así como el

---

<sup>63</sup> Entendido como aquel espacio virtual producido con medios de la cibernética, en este contexto se enfatizan las redes sociales de las que el consumidor forma parte y todas las interacciones que pueda tener en dicho medio virtual.

tipo de dominación racional –de Weber (2003)– se ven interrelacionados, ya que el pospanóptico lo rebasa al eliminar por completo esa relación de poderes y al equiparar su dinamismo en cuanto a que el vigilado –o bien el que obedece– por su propio “gusto” es sometido.

Aunado al elemento del pospanóptico se encuentra el *escurrimiento*, en el que un país ya no pretende sólo la apropiación física de otro territorio para su dominación<sup>64</sup>, sino la demolición de muros que impidan el flujo de nuevos poderes para abrir nuevos espacios, lo cual genera la desintegración social, el descompromiso, el golpe y finalmente el arte de la huida, para reiterativamente configurar un siguiente ciclo de escurrimiento (Bauman, 2013).

En segunda instancia se enfatiza que para poder reconfigurar las formas estatales de dominación se tendrían que *destruir* por un lado las *formas keynesianas* y por el otro *construir* las *formas neoliberales*. Bauman (2009) resalta que el detrimento del papel del Estado<sup>65</sup> suscitado por la modernidad y el consumismo encolerizado, serían detonantes claves para el inevitable *ascenso y descenso del Estado en su modelo benefactor*. Ya que el afán del crecimiento económico orilla a la

---

<sup>64</sup> Visto como la desterritorialización.

<sup>65</sup> Detrimento en cuanto a sus estructuras económicas y aumento en cuanto a sus estructuras de seguridad.

sociedad a establecerse en un régimen productivo, en donde se desplaza a la costumbre por la propia modernidad ejercida en la instantaneidad.

La *creación de las formas neoliberales* permitirá a su vez el *proceso de legitimación* a través del decreto de disposiciones legales, la emisión de políticas estructurales y la creación de instituciones, en donde estas nuevas formas estatales de dominación se legitiman. Cordera y Tello (2010) refieren que en la transición del papel del Estado, se tiene el fin del modelo de desarrollo –mercado interno– que se instrumentó desde el Cardenismo en los años 30; a la sucesión de eventos históricos que fueron trasmutando poco a poco la economía del país –y que tuvieron su clímax en la época de endeudamiento que se tuvo en la década de los 80– en donde se reconfiguró la forma del Estado por la implantación de una nueva a partir de la crisis de 1982 en México, lo cual a su vez conllevó a la eliminación de formas keynesianas que en su momento promulgó el Estado.

Cordera y Tello (2010) identifican los rasgos clave de la economía mexicana al despuntar los años ochenta en su carácter desigual expresado tanto en el desarrollo diferente de las regiones, como entre los sectores productivos y al interior de los mismos, así como en las condiciones de los trabajadores. El carácter “desigual y combinado” fue el rasgo

distintivo que resaltó el “desarrollo” mexicano en esa época. Además, es importante mencionar que, desde la economía, el deterioro del capital natural del país y sus implicaciones negativas para la ecología ya se vislumbraban como devastadoras. Por lo tanto, la manera en que se enfrentó la *crisis del 82* estuvo enfocada en la recuperación de la confianza de los mercados internacionales de capitales; siendo el pago de la *deuda externa* la única *decisión de la política económica* –a través de los ajustes estructurales–.

La creación de las formas neoliberales mediante las *reformas estructurales* fomenta una economía abierta y de mercado que posibilita la transformación de un bien común en un bien privado y que pone en disponibilidad la riqueza natural del país. Este hecho fundamental es el que ocurre con el vital líquido, ya que éste se transfiere de manos públicas a privadas –a través del proceso de legitimación–, propiciando la *privatización del agua*. En este elemento se desencadena el *primer proceso de enajenación* en el sentido de la pérdida del vital líquido por parte de la comunidad. Pacheco-Vega (2015) destaca cómo se llegan a articular distintos factores que producen la privatización del agua para pasar formalmente a la mercantilización de este bien natural. En el análisis crítico que realiza resalta la metodología que utiliza a través del modelo del

*régimen de políticas públicas*. Cordera y Tello (2010, p. 36) “sostienen que en la actualidad la disputa política por la dirección del Estado parece quedar suspendida en un corrosivo *juego oligárquico*, mientras la cuestión social se extiende y profundiza para darle a la nación una funesta perspectiva de confrontación ‘sin política’, o peor aún antipolítica”.

Las instituciones financieras internacionales, como el Fondo Monetario Internacional (FMI) y el Banco Mundial (BM) abogaron e impusieron un tipo de gestión de la economía favorable a la privatización de empresas, a la disminución del gasto público, al retiro de controles arancelarios y a la retracción de la acción pública, elementos conocidos como el “Consenso de Washington” (Cordera y Tello, 2010).

Shiva (2003, pp. 96, 100, 103) destaca que las políticas impuestas por el Banco Mundial y las reglas de liberalización comercial esbozadas por la Organización Mundial de Comercio (OMC) crean una cultura aplastante de estados corporativistas en todo el mundo [...]. En Argentina, Chile, México, Malasia y Nigeria han emergido ambiciosos programas de privatización impulsados por el Banco Mundial desde principios de los noventa. Mientras el Banco Mundial promueve la privatización del agua mediante programas de ajuste estructural y condiciones, la OMC instituye la privatización del agua mediante

reglas de libre comercio personificadas en el GATT (General Agreement on Tariffs and Trade [Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio]). El GATS (General Agreement on Trade in Services [Acuerdo General sobre el Comercio de Servicios]) promueve el libre comercio de los servicios, incluida el agua. La OMC promueve el GATS como un tratado “integral”, y cita la libertad de los países para liberalizar el comercio progresivamente y desregular poco a poco distintos factores.

Rolland y Vega (2010) resaltan como se crea un *falso discurso de la “escasez”* del agua cuando en realidad la disputa se centra en su desigualdad, en su contaminación y en la falta de mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Destacan que es de suma importancia contemplar los factores de desencadenamiento para dicha problemática, ya que la influencia del contexto económico, el grado de dependencia internacional y los modelos de manejo del agua han mermado su disponibilidad. Concluyen con un estudio de la gestión del agua en México<sup>66</sup> que detalla cómo pasó de ser un bien común administrado por organismos públicos a un bien privado promovido por los organismos económicos internacionales. Asimismo, Delgado (2014, pp. 61-62) refiere al *marco regulatorio creado* para el embotellado de agua en México:

---

<sup>66</sup> Enmarcado por un contexto hídrico, económico y político-jurídico.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 1992 y su Reglamento de 1994, concretados en el gobierno de Carlos Salinas de Gortari (1988-1994), eliminaron la relativa orientación social que el Estado había previamente dado a la administración del agua. Más adelante, el 29 de abril de 2004, se aprobaría una reforma a la Ley de Aguas Nacionales que formalizaría el carácter meramente recaudador del Estado en la gestión del agua, en especial, a partir de concesiones del servicio público a entes privados, bajo el criterio de “el agua paga el agua”. En ese sentido es que algunos críticos se han referido al proceso, impulsado por un gobierno federal encabezado por un ex-CEO de la Coca Cola en México, Vicente Fox Quesada, como aquel que derivó [...] en la renuncia a los principios básicos de justicia social<sup>67</sup>. A pesar del marco regulatorio pronunciado por el Estado, la *contradicción* más fuerte se encuentra en el *pronunciamiento* de la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) del 28 de julio de 2010, que reconoce plenamente el *derecho al agua potable* y al saneamiento como derechos humanos básicos. Asimismo, en el artículo 4 ° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se reconoce en términos de [...] acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. [...] Con base en dicho panorama se tendrían que analizar los instrumentos regulatorios de concesión del agua.

---

<sup>67</sup>Albertani, 2004; citado por Delgado, 2014, p. 61.



Por otro parte, la modernidad misma genera una fragilidad humana en la cual se respira una *adicción a la seguridad y un miedo al miedo*<sup>68</sup>. El Estado entonces cobra vital importancia en cuanto a la creación de un *régimen del sabotaje y a la lógica del pánico* como argumento central de la política<sup>69</sup> (Vásquez Rocca, 2008b, pp. 5, 7). Este elemento teórico pretende explicar cómo el Estado ejerció ese temor y desconfianza –hacia el agua del grifo– al consumidor, a través de *tecnologías de poder*; este término fue introducido por Foucault (1990) y referido a los métodos que determinan las conductas de los sujetos –dispositivos, sistemas prácticos, reglas, normas, procedimientos y dispositivos de sujeción–. Dichas tecnologías fueron introyectadas a la población mediante una *política de prevención al agua del grifo*, a través de la publicidad masiva en todos los medios de comunicación haciendo referencia a que el agua de México estaba infectada de cólera. En este otro punto surge el *segundo proceso de enajenación* en el sentido de la pérdida de las formas tradicionales de consumo que se tenían, en relación con el uso de métodos tradicionales de potabilización del agua del grifo, o

---

<sup>68</sup> Visto como el temor a la incertidumbre y a la ignorancia con respecto de la amenaza y de lo que no se puede hacer para combatirla.

<sup>69</sup> Vásquez Rocca, 2008a; citado por Vásquez Rocca, 2008b, pp. 7.

bien a la forma de consumir el agua directamente de la llave. Además, en este momento inicial surge el *primer proceso de alienación* en cuanto a que el consumidor tendrá cierta percepción de la salubridad del agua de su grifo.

Como cierre de este primer momento (dentro de la articulación del argumento central, Figura 2) se puede decir que el Estado –circunscrito en el Nuevo capitalismo– para mantener sus relaciones de poder tuvo que reconfigurar sus formas estatales<sup>70</sup> de dominación y legitimar la forma estatal neoliberal creada para poder privatizar el agua. En este sentido las dos funciones primordiales del papel del Estado son: asegurar las condiciones para la reproducción del capital<sup>71</sup> y asegurar las condiciones de legitimidad de los procesos sociales<sup>72</sup>.

Todo ello con el objeto de establecer los procesos de enajenación del agua<sup>73</sup>, tanto a nivel comunitario como a nivel individual. Además, de

---

<sup>70</sup> En cuanto a la destrucción de las formas estatales keynesianas y a la creación de las formas estatales neoliberales.

<sup>71</sup> Como, por ejemplo, a través de las reformas estructurales encabezadas en la década de los noventa.

<sup>72</sup> Como, por ejemplo, a través de la apariencia del proceso de elección y del derecho al voto.

<sup>73</sup> En este sentido, la naturaleza no es concebida como un ente dador de vida, por lo contrario, es reducida únicamente a una cosa.

cimbrar las dudas en cuanto a la percepción de la salubridad del agua del grifo en los consumidores, hecho fundamental que desencadenó el primer proceso de alienación en cuanto al cuestionamiento de la seguridad del agua suministrada por la red hidráulica proveída por el Estado.

## *2.2 El papel de la Empresa del agua embotellada*

En este punto se analiza cuál es el papel de la Empresa de agua embotellada en el desencadenamiento del cambio de hábito del consumo tradicional del agua al consumo masivo industrial de la misma. Se retoma la Figura 4 para tener un mayor entendimiento del papel que conlleva la Empresa de agua embotellada en la articulación de los procesos del argumento central. Para dar sustento y soporte a dicho análisis, se focalizan diversos elementos teóricos que permiten explicar el objeto de estudio.

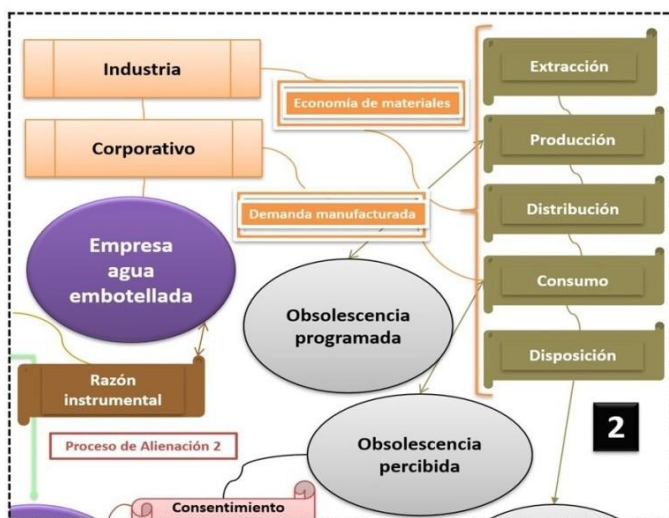


Figura 4. Argumento Central – Papel de la Empresa del agua embotellada

En el esquema del argumento central del papel de la Empresa del agua embotellada, se identifica que el hilo conductor del proceso anterior (visto en el esquema del papel del Estado) es precisamente la *privatización del agua*, ya que gracias a ésta la Empresa del agua embotellada puede adquirir las concesiones<sup>74</sup> para la extracción del vital líquido y por ende su posterior mercantilización.

<sup>74</sup> Derivadas de la reconfiguración de las formas estatales de dominación y del proceso de legitimación efectuado por el Estado en cuanto a sus nuevas formas neoliberales.

La CONAGUA (Comisión Nacional del Agua<sup>75</sup>) al cierre del 2012 registró un total de 369,012 títulos de *concesiones de agua*—superficial y subterránea— en el país. De los cuales, 4,978 títulos correspondían a la industria. El análisis sugiere que a nivel nacional hay poco menos de 500 concesiones a titulares que reconocen ser explícitamente embotelladores de algún tipo de bebida —carbonatadas, no-carbonatadas, cerveza y otras—, las cuales suman un monto total de 242.8 millones de m<sup>3</sup> de agua al año (REPGA, 2012; citado en Delgado, 2014, p. 66).

Es fundamental tener la comprensión clara de lo que el proceso de privatización representa per se. Pérez-Ramírez (2013) destaca este tipo de análisis respecto a la evolución que tanto la privatización como las fusiones y adquisiciones de las grandes empresas han tenido lugar en las últimas décadas en México. Todo ello para dilucidar qué factores fueron desencadenado este suceso y por ende permitiendo la incursión hacia el mercado global —a través de *alianzas oligopólicas*<sup>76</sup> de las *transnacionales*<sup>77</sup>—.

---

<sup>75</sup> Organismo generado a partir de las nuevas formas neoliberales en el año de 1989.

<sup>76</sup> El libre comercio de mercado y la apertura del mundo a una competencia “libre” y “abierto” se ve mermada por el poder monopolístico y oligopólico (mercado dominado por un pequeño número de vendedores).

<sup>77</sup> Refiere a una empresa que conlleva negocios y actividades instituidas en diferentes países.

Asimismo, Harvey (2005) resalta que el capital para resolver su crisis de sobreacumulación se ve obligado a expandirse geográficamente<sup>78</sup>. Mediante la creación de nuevos espacios dinámicos de acumulación que tendrían que ser destruidos luego por el propio ciclo de sobreacumulación que conlleva su reproducción. En este sentido se vislumbra la venida de transnacionales a México que permiten liberar esos excedentes de capital ahora en un nuevo espacio geográfico.

En México y en todo el mundo las cuatro empresas *transnacionales líderes del mercado del agua embotellada* son: “Coca Cola”, “PepsiCo”, “Danone” y “Nestlé” (Delgado, 2014). A pesar del dominio de las empresas transnacionales, “se indica que cerca del 11% del mercado mexicano se encuentra capturado por más de 7,000 micro y pequeñas empresas purificadoras de agua participando en el mercado” (El Financiero, 2013; citado por Pacheco-Vega, 2015, p. 227).

Por otra parte, para comprender la ontología misma de la Empresa del agua embotellada se

---

<sup>78</sup> La circulación del capital conlleva: la búsqueda de nuevas formas de acumular ganancias, la estabilización entre las relaciones de producción/consumo por parte de los flujos de dinero, un capital ficticio (tensión entre sistema financiero/base monetaria) y la incertidumbre en cuanto al valor del valor.

requiere la introducción del elemento teórico de *la acción social del tipo racional con arreglo a fines o medios* introducida por Weber (2014), en donde se enfatiza que los individuos ejercen diversas acciones sin estar conscientes de que en algunas ocasiones están actuando en función de otros. Dichas acciones son encaminadas a un fin, en donde para alcanzarlo habrá distintos medios con los que se vencerán los obstáculos y condiciones, a manera de que el resultado obtenido corresponda con el fin buscado.

Se infiere entonces que con tal de obtener un valor monetario se puede pasar sobre cualquier cosa o ente, entendido como arrasar con la propia naturaleza para lograr dicha finalidad en cuanto a la acumulación del capital se refiere. Es interesante apreciar cómo se puede hacer una analogía con la *razón instrumental*: “[...] Al abandonar su autonomía la razón se ha convertido en instrumento [...] La razón aparece totalmente sujeta al proceso social. Su valor operativo, el papel que desempeña en el dominio sobre los hombres y la naturaleza, ha sido convertido en criterio exclusivo [...]” (Horkheimer, 1973, p.31; citado por Izquierdo, 1991, p. 229).

La razón instrumental convierte el conocimiento científico –que podría ser utilizado en beneficio de la humanidad– en un conocimiento meramente utilitario que devendrá en la incorporación de

Empresas que comercializarán el vital líquido. Es importante dilucidar que la Empresa del agua embotellada se clasifica en dos operaciones fundamentales para su funcionamiento. La primera operación es la *Industria*, la cual a través del sistema de la *economía de materiales* se reproduce en cinco etapas: *extracción, producción, distribución, consumo y disposición* (Leonard, 2012).

Leonard (2012) señala que en la *etapa de la producción* se imprime lo que se conoce como *obsolescencia programada*, la cual es una forma de expresar “diseñado para ser desechado”, es decir se fabrican estratégicamente productos que están diseñados previamente para fallar o caducar lo más pronto posible; de esta manera se podrán tirar y reemplazar casi de inmediato. Berman (2013) enuncia que todo lo sólido se va desvaneciendo poco a poco en el aire, siendo lo tradicional y honorable reemplazado por lo moderno y desechable; propiciando con ello una fragmentación y un cambio caótico. En este sentido la *destrucción creativa* es un elemento teórico fundamental para la comprensión de la obsolescencia programada.

Schumpeter (1934) enfatiza que el proceso de destrucción creadora<sup>79</sup> es el leitmotiv progresista

---

<sup>79</sup> Proviene de una imagen Nietzcheniana –en el corazón de su teoría del progreso económico está el hombre creador–.



del desarrollo del capitalismo benévolo, ya que la Ilustración buscaba ser a un mismo tiempo destructivamente creativa y creativamente destructiva. Por lo tanto, el modernista tendría que destruir para crear, en el sentido de llevar hasta las últimas consecuencias la innovación técnica y social en el nombre del “progreso” (citado en Harvey, 1990, p. 33). La obsolescencia programada conllevó una fuerte controversia moral entre la comunidad científica, en los tiempos en que se pensaba rescatar la economía de las naciones ocasionada por la “Gran Depresión”. Ya que algunos diseñadores e ingenieros estaban en contra, al no considerar ético ni profesional hacer fallar los productos antes de tiempo. Baudrillard (1981) menciona que la cultura posmoderna es una *cultura excremental*, en donde el dinero es igual al excremento (citado en Harvey, 1990, p. 122). La Industria del agua embotellada no hace más que producir lo más pronto posible para inmediatamente desechar. Es de esta forma en la que el sistema de la economía de materiales –a través de sus cinco etapas– provocará un *daño colateral en materia sanitaria y ambiental* que impactará directamente al consumidor.

La segunda operación clave que necesita la Empresa del agua embotellada para su vital funcionamiento, es el *Corporativo*, en éste se logra maquinar una cuasi perfecta estrategia de *demanda*

*manufactura* con la cual se atemoriza, seduce y engaña al consumidor. Esta estrategia está presente en la *etapa del consumo* y es introyectada al consumidor a través de la *obsolescencia percibida*, esto es convenciéndolo de desechar el producto que todavía le es perfectamente útil (Leonard, 2012). La obsolescencia percibida se conecta a través del *consentimiento de la compra* de agua embotellada que el consumidor hace, gracias a la persuasión tan efectiva de dicha estrategia. En este punto preciso es donde surge el *segundo proceso de alienación* en donde el consumidor es enganchado por toda la seducción que la Empresa del agua embotellada ya ha desenvainado en él.

En consecuencia, a este punto, Baudrillard (2009) refiere que el control del poder<sup>80</sup> en función de los códigos y signos subsume a los sujetos a una vida en función del consumo; ya que en este Nuevo capitalismo es fundamental no sólo producir mercancías sino también fabricar las necesidades – como se vio previamente a través de la demanda manufacturada–. Lo cual permite entrar en el juego del sensacionalismo y la simulación colectiva de la seducción de los deseos, no así en las necesidades reales de consumo; con ello se perpetúa un código totalitario productor de diferencias sociales. Todo

---

<sup>80</sup> Estas estrategias han penetrado en el lenguaje hasta saturar y agotar las fuentes de significación de lo real.

ello provoca que el consumidor no focalice la satisfacción de sus necesidades reales, sino más bien, que aspire –a través de la mediación del signo– a satisfacer necesidades imaginarias, estimuladas por la publicidad e incitadas por el sistema de retribuciones simbólicas.

De tal suerte que la *sociedad del consumo* podría definirse así: ‘Forma global que tienen los hombres y la sociedad de vivir en un ‘imaginario colectivo’. Toda la realidad de los objetos, de la cultura y de las sociedades es captada dentro de este imaginario omnipresente a través de sus signos y sus símbolos. De manera que las características lógicas de este imaginario son la desconfianza y la ocultación de lo real y de la historia’” (Baudrillard, 2009, p. 47).

Asimismo, tanto la naturaleza como el individuo son objetivados a través de códigos y símbolos mediante la producción de una *hiperrealidad*<sup>81</sup> en un mundo cosificado –o bien reificado–, desplazando la ontología de lo real a una estrategia de simulación. Los modelos no representan a la realidad, sino que precisamente tienden a simularla y al simularla la construyen a su imagen y semejanza (Baudrillard, 2000). Aunado a este elemento, O’Connor (2002)

---

<sup>81</sup>Esta noción refiere a la dislocación del orden simbólico, en donde se entra en un juego de espejos entre el ser burlado –por la seducción del objeto– y su discurso.

resalta que el *capitalismo rehace la naturaleza* – biológica, física, política e ideológicamente– a su propia imagen y semejanza con la finalidad de perpetuar la reproducción del capital. Es precisamente esa relación de los seres humanos con la naturaleza, el área que el capital tiene que someter<sup>82</sup> y separar para lograr sus fines de acumulación (Veraza, 2008).

Con lo descrito anteriormente, se entiende que la Empresa de agua embotellada precisa *codificar* –a través de distintas connotaciones y significaciones– al elemento *agua* –considerado como un símbolo sagrado por nuestros antepasados–, en un símbolo de estatus social. Por medio de imágenes que evocan “actividad”, “salud”, “relajación”, “pureza”, “satisfacción”, “seducción”, “belleza”, “juventud”, “inteligencia”, “energía”, “popularidad”, “moda”, “ecologismo”, “sustentabilidad”, “las grandes industrias embarcan a los consumidores para que adquieran algo que sólo existe, fundamentalmente, en un ambiente imaginario” (Clarke, 2009, p. 28).

En concordancia, Bauman (2007) introduce un elemento teórico respecto al *fetichismo de la subjetividad*, en donde el ser humano aprecia su valor en torno al consumo que ejerce, fantaseando sobre una supuesta soberanía en donde él mismo

---

<sup>82</sup> Provocando una deshumanización y desnaturalización a la par.

elige entre todas las opciones del mercado. Frases como la de “compro, luego existo”<sup>83</sup>, son indicadores claves de que el individuo se convierte en el valor del objeto mismo que adquirió –como un objeto que pierde o gana valor a través de lo que compra– y en la competencia misma de adquisición desmedida de mercancías “necesarias” para su supervivencia a través de la sociedad del consumo.

Cabe resaltar que la premisa del fetichismo de la subjetividad está fundamentada en el *fetichismo de la mercancía*, concepto desarrollado por Marx (2007) en cuanto a que el dinero y su intercambio enmascaran las relaciones sociales existentes entre las cosas. Ya que éstas se priorizan por su valor de cambio y no por el verdadero valor de uso que tienen, máxime si se precisa que el agua por su valor vital no debería tener precio –pues, ¿cuánto cuesta la vida?–. Además, “todas las huellas de la explotación están borradas en el objeto; no hay marcas de dedos de la explotación en el pan de todos los días”, ni huellas que refieran a la alteración de los ciclos naturales del agua ni de su despojo legalizado de las comunidades (citado en Harvey, 1990, p. 121). Asimismo, Harvey (1990) señala que la publicidad destruye en su imaginaria todas las huellas de la

---

<sup>83</sup> Frase introducida por Guadalupe Loeza, en su obra “*Compro luego existo*”, en su última edición en el año de 2013.

producción y refuerzan el fetichismo que surge en el intercambio de la mercancía. Por lo que se tendría que arrancar la máscara del fetichismo y aprehender las relaciones sociales y de explotación a la naturaleza que se ocultan tras ella. Baudrillard (1981) señala que “el posmodernismo toma las máscaras sin considerar directamente otros significados sociales que no sean los referidos a esa actividad de enmascaramiento” (citado en Harvey, 1990, p. 122).

Como cierre de este segundo momento (dentro de la articulación del argumento central, Figura 2) la Empresa del agua embotellada a través de la concesión del agua y del funcionamiento de la economía de materiales, imprime la fecha de caducidad en su producto –la obsolescencia programada– con la finalidad de tirarlo y reemplazarlo lo más pronto posible para la reproducción constante del capital. No obstante, en el consumo de agua embotellada se tiene otro enfoque mercadotécnico<sup>84</sup>, ya que a través de la

---

<sup>84</sup> Debido a que desde el 2010 se formalizó el etiquetado de la fecha de caducidad en el agua embotellada, con una vigencia de 2 años. No obstante, dado el incremento exponencial en el consumo, se infiere que el factor clave que más ha desencadenado este nuevo hábito –desde el papel de la Empresa de agua embotellada– es la obsolescencia percibida con la estrategia del “consumo óptimo de agua”, de 2 litros diarios.

obsolescencia percibida es como el consumidor consiente la compra del producto y permite que este ciclo de consumo se perpetúe. Todo ello, gracias al modo de vida normalizado que permite la construcción de sujetos a fines al modo de consumo –mediante procesos subjetivos atravesados por relaciones de poder y control–. La obsolescencia percibida será el vínculo directo que se le introyectará al consumidor –a través de la propaganda y la publicidad– para conformar el segundo proceso de alienación en esta dinámica sostenida en el argumento central.

### *2.3 El papel del consumidor*

En este punto se comprende cuál es el papel del consumidor en el desencadenamiento del consumo de agua embotellada. Se retoma la Figura 5 para tener un mayor entendimiento del papel que conlleva el consumidor en la articulación de los procesos del argumento central. Para dar sustento y soporte a dicho planteamiento, se focalizan diversos elementos teóricos que ayudan a responderlo.

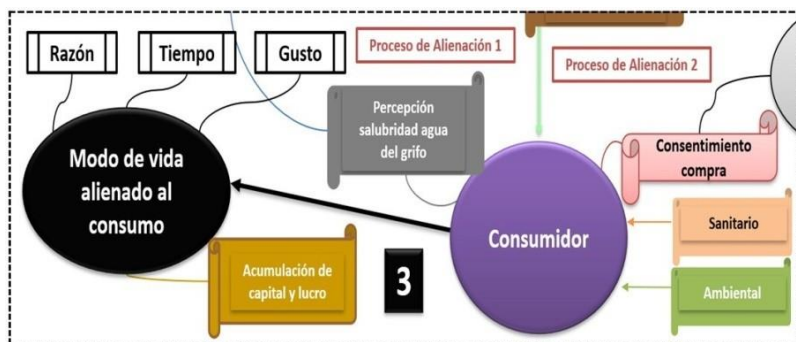


Figura 5. Argumento Central – Papel del consumidor

*Los procesos de alienación* están desarrollados a través de la aprehensión que el consumidor adopta de esta “realidad ajena o extraña”<sup>85</sup>. Ello se deriva del desarrollo capitalista per se, ya que como el capital no pueda cambiar al objeto, hace mutar al sujeto. El objetivo sería entonces enderezar el impulso del sujeto y su acción trascendente en otra *dirección*, una que lo *desnaturalice*; que lo *aliene*. Para hacer mutar al sujeto debe transformar la estructura de los objetos que consume y lo constituyen, así como sus formas de organización reproductivas y arraigar estas modificaciones en nuevos objetos de consumo *ad hoc*.

Todo ello permite trastocar al sujeto, haciendo mutar su conciencia al transformar sus percepciones

<sup>85</sup> A través de una introyección –identificación, incorporación e internalización– psicológica y emocional que lo hace actuar bajo una realidad ajena.



–mutar su fisiología e introducir en su cerebro mensajes ideológicos a conveniencia–. Estos procesos de alienación se identifican en el consumidor, en parte por la *percepción* que tiene respecto a la *salubridad del agua del grifo*<sup>86</sup> –impulsada por el Estado, primer proceso de alienación– y por la obsolescencia percibida<sup>87</sup> que recibe a través de la propaganda mercadotécnica –generada por la empresa de agua embotellada, segundo proceso de alienación–, lo cual *subsume*<sup>88</sup> al individuo a un *modo de vida alienado al consumo*. En este sentido la *explotación del plusvalor* se orienta a la construcción de un nuevo cuerpo material de consumo, con el fin último de la *acumulación de capital y el lucro* (Veraza, 2008).

De acuerdo con Baudrillard (2009) el modo de vida alienado al consumo le permite al sujeto convertirse para sí mismo en otro, ya que su imagen no se ha perdido ni ha quedado abolida

---

<sup>86</sup> Factor fundamental que da pauta a que el consumidor acepte una nueva forma individual de consumo.

<sup>87</sup> Este nuevo hábito de consumo es ofertado por la Empresa de agua embotellada y aceptado por el consumidor a través de su libertad para elegir o bien a través de su *consentimiento de compra*. Para Hayek (1990) la libertad es un estado no coercitivo en donde no se perjudica a nadie; se goza totalmente de los triunfos, pero al mismo tiempo se tiene responsabilidad sin límite de los propios desaciertos.

<sup>88</sup>A esta noción es a la que refiere Veraza (2008) como la *subsunción real del consumo bajo el capital*.

fortuitamente, sino que ha sido vendida –en la esfera de la mercancía–. Esta situación provoca que se rompa la transparencia de la relación que el individuo tiene consigo mismo y con el mundo, la vida por consiguiente pierde todo sentido real. Debido a que todo se vuelve un espectáculo, en donde se evocan y se orquestan imágenes, signos y modos consumibles. El sujeto ya no se refleja en el espejo, se absorbe en él y queda abolido en él. El consumidor es el orden de los signos –en donde el objeto resulta nada–, lo que es igual al vacío en las relaciones humanas y a las fuerzas productivas y sociales que se reifican en ese preciso momento.

Es importante mencionar que la introducción hacia nuevas formas de alienación<sup>89</sup> –en donde ya no sólo se apropia la fuerza de trabajo como en su momento lo enunciaba Marx–, aparecen en escena de una forma muy sutil y subliminal como mecanismos de dominación –o formas de control–; enmarcadas ahora dentro de la sociedad del consumo. *Barrera* (2011) destaca diferentes tipos de alienación –haciendo una analogía de los distintos tipos de alienación que han manejado Marx, Bourdieu y Foucault– que el propio cuerpo humano va trasmutando debido a factores externos y ajenos a él.

---

<sup>89</sup> Se proponen tres formas de alienación en función de la razón, del tiempo y del gusto.

Marcuse (2010) hace una crítica respecto a la sociedad industrial avanzada y por consiguiente del término que denomina *conciencia feliz*, para dar pauta a lo que se propone considerar la *alienación de la razón*. A las personas le son creadas falsas necesidades que lo integran al sistema productivo y de consumo, por medio de la publicidad exacerbada de los medios de comunicación; este hecho le genera la adquisición de un sólo universo, siendo éste su unidimensionalidad. Por lo que, los medios de comunicación y la misma industria cultural son los encargados de promover en el individuo un estilo de vida acorde a la lógica capitalista; lo cual provoca que el ser humano crea vivir una “aparente libertad”, en donde la conciencia humana es fetichizada a las necesidades ficticias de consumo, generando una especie de “secuestro de la razón crítica” y dejando sólo la desublimación del instinto libidinal<sup>90</sup>. Este despojo de la imaginación del individuo se ve reforzado por iconografías aplastantes de un “modelo ideal a seguir” que la publicidad “estupidizante” crea como conciencia feliz, lo cual inhibe y complejiza la posibilidad de cambio hacia la emancipación.

---

<sup>90</sup> Según Marcuse (2010), se reduce a la genitalidad, enfocado en que el cuerpo mismo del hombre es sólo su ansia de libertad.

Para abordar el *moderno*<sup>91</sup> *consumismo líquido* se tendría que entender que el mismo consumidor ha sido alienado por sí mismo, por la aspiración insaciable que le genera el poder desear y anhelar dicho consumo. El individuo llega a negar el significado del tiempo y se opone a dar importancia al pasado, a la tradición e incluso a su propio futuro, por la adquisición de infinitas posibilidades de un presente eterno, en el cual pueda eliminar y reemplazar<sup>92</sup> cuanta mercancía pueda comprar. El concepto que se introduce respecto a lo líquido se enfatiza en la premisa de las propiedades físicas y químicas que conllevan *per se* los propios líquidos para su movimiento, ya que éstos tienden a adaptarse al “artefacto” en que se les introduzca, a ser flexibles, livianos, escurridizos, entre otras cualidades (Bauman, 2013). En este sentido se introduce a modo de metáfora de la etapa moderna, la *alienación del tiempo*.

Asimismo, Echeverría (2013) resalta que existen formas elementales de oposición entre el campo y la ciudad en cuestión de la dimensión del tiempo. Ya que en la *temporalidad rutinaria* se

---

<sup>91</sup>Es importante mencionar que la modernidad tiene que ver con el proyecto de la Ilustración, la noción del progreso y la racionalidad instrumental.

<sup>92</sup> El autor refiere que el moderno consumidor líquido no enfatiza en la acumulación del producto, sino que lo prioriza por ser desechable.

repite sin cuestionar la forma establecida de su sociabilidad y se reproduce la identidad establecida. Mientras que en la *temporalidad extraordinaria* se enfatiza el carácter político de la reproducción social, se rompe el automatismo y se afirma la capacidad del individuo de inventar libremente formas de sí mismo y de su mundo. El espacio de la reproducción social se organiza de acuerdo con la estructura del tiempo de la vida social, en donde la estructuración de la temporalidad social se reproduce en el territorio de la sociedad. En este sentido subyacen dos formas de tiempo, la primera respecto a la *temporalidad* –rutinaria– marcada por los propios ritmos de la *naturaleza* y el segundo respecto a la *temporalidad* –extraordinaria– impuesta por los ritmos de la *máquina*. Siguiendo a Bauman (2013), se tendría que en un tiempo líquido la sociedad del consumo<sup>93</sup> está determinada por la instantaneidad y la velocidad que los ritmos fabriles y voraces del capital le exigen para su reproducción.

Siguiendo la línea del consumo, vista como la estrategia de distinción social desplegada por diferentes grupos. Existe un conjunto de esquemas generativos a partir de los cuales los sujetos perciben

---

<sup>93</sup> En el tiempo de la máquina, el sujeto ve reducido cada vez más su tiempo libre a un tiempo de “calidad”. El tiempo tendría que ser usado entonces “productivamente”, evitando tener tiempo de ocio ya que “el tiempo es dinero” –frase atribuida a Benjamín Franklin–.

el mundo y actúan en él, de igual manera es ahí donde se producen los pensamientos, percepciones y acciones de la gente. Dichos esquemas, son “la estructura estructurante estructurada”, que genera el principio de división de clases sociales y lo que da origen al estilo de vida del individuo; todo ello es inherente al *habitus*<sup>94</sup>. La interiorización que hace el ser humano de dichos gustos los refleja entonces en la práctica del consumo y posteriormente en el enclasmamiento social (Bourdieu, 2012). Lo interesante a retomar es entonces el gusto que el individuo cree que genera por sí solo y no por actores externos a él; lo cual pretende identificar una nueva forma de *alienación del gusto* a través de dichas percepciones ejercidas en parte por el individuo y las que le son generadas no necesariamente por su libre elección. Es fundamental apreciar como el gusto –siendo un sentido corporal mediante el cual se perciben y distinguen los sabores– es alienado a la construcción

---

<sup>94</sup>“Una primera aproximación a este concepto nos permite definirlo como un conjunto de disposiciones duraderas que determinan nuestra forma de actuar, sentir o pensar. Todo ello se manifiesta tanto en las estructuras independientes de la conciencia y de la voluntad de los agentes individuales, grupales, clases o sectores (estructuras objetivas), como en los compendios de percepción, de pensamiento, de acción que componen socialmente nuestra subjetividad (estructuras subjetivas)”, enfatiza Barrera (2011, pp. 7-10).

de cuerpos funcionales para el consumo. En este sentido el “gusto” por un agua desmineralizada es evidente –por el alto índice per cápita que se tiene a nivel mundial– en las preferencias de consumo en México.

Como cierre de este tercer momento (dentro de la articulación del argumento central, Figura 2) el consumidor –a través de la percepción de la salubridad del agua de su grifo y mediante la obsolescencia percibida– consiente por medio de la compra, un modo de vida alienado al consumo. El papel del consumidor en esta dinámica cíclica y exponencial de consumo es sumamente activo, ya que gracias a la compra que decide hacer, genera una demanda más para perpetuar este periodo infinito de interacciones de mercantilización. La alienación que se le introyecta está perfectamente maquinada para poder mermar su razón –como si se le insertase un chip en el cerebro que lo engancha al consumo–, su tiempo –como si siguiese la temporalidad de la máquina y de la modernidad misma– y el gusto –como si se le adiestrara para percibir sabores a fines a los productos que se le venden–.

## 2.4 Las principales implicaciones adversas en materia ambiental y sanitaria

En este punto se identifican cuáles son las consecuencias por el consumo de agua embotellada en materia ambiental y sanitaria. Se retoma la Figura 6 para tener un mayor entendimiento de la articulación que conlleva el consumidor en este proceso. Para dar sustento y soporte a dicho planteamiento, se focalizan diversos elementos teóricos que ayudan a responderlo.

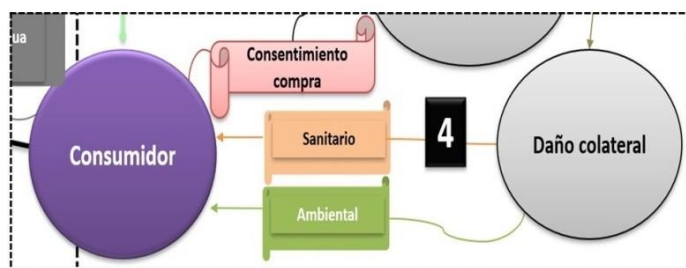


Figura 6. Argumento Central – Daño colateral

Bauman (2013) introduce el elemento teórico referente a la *disolución de lo sólido, profanación de lo sagrado*, en donde existe una desautorización y negación del pasado y primordialmente de la tradición, lo que conduce a la progresiva emancipación de la economía de sus tradicionales ataduras en el ámbito político, ético y cultural. En



donde la rigidez del nuevo orden económico es el “artefacto” y el sedimento de la libertad de los agentes humanos. Bajo estas ideas se identifica cómo tanto la naturaleza como el propio ser humano, son relegados a un último término con tal de priorizar el ámbito monetario o bien el consumo en la sociedad industrial avanzada. La transformación absoluta de la vida humana en un bien de cambio permite la existencia de una nueva “clase”, denominada “infrac clase”, en la cual existe gente sin valor de mercado, incapaz de consumir en éste. Esta premisa permite inferir como dentro de esta “infrac clase” también se podría encontrar a los bienes naturales, ya que por sí solos no pueden defenderse o alzar la voz en pro de sus derechos y menos participar dentro de la sociedad del consumo.

En los *daños colaterales* se enfatizan las consecuencias que el consumo de agua embotellada trae consigo, primordialmente en el ámbito *ambiental* –naturaleza– y *sanitario* –ser humano– (Bauman, 2013). Todo ello deviene del *sistema de la economía de materiales* que la Industria del agua embotellada emplea a través de sus cinco etapas de reproducción –extracción, producción, distribución, consumo y disposición– (Leonard, 2012). El *sometimiento real del consumo* permite ver efectos en la salud de las personas, las cuales han sufrido una degradación material. Mientras que los

deterioros materiales cualitativos se han padecido en el ambiente y la urbe. La salud y la enfermedad no son neutrales ni espontáneas, sino que son producidas social e históricamente a partir del tipo de alimentación suministrada. Por lo tanto, la relación que se tiene entre los seres humanos y la naturaleza es el área primordial que el capital somete a su conveniencia. Todo ello hace peligrar, sin lugar a duda, la *reproducción de la vida en el planeta* (Veraza, 2008).

En *materia ambiental*<sup>95</sup>, se tiene que las *botellas de PET* liberan en el aire y agua contaminantes y químicos tóxicos altamente peligrosos cuando son *producidas* y nuevamente cuando son *quemadas o enterradas*; además de la lixiviación que tienen cuando las botellas de agua son *almacenadas* por periodos prolongados de tiempo en los anaqueles; destaca la Royal Society of Chemistry Journal. Las emisiones de dióxido de carbono por la producción de botellas de plástico, es una causa principal del calentamiento global y el cambio climático, en tanto los dióxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno son los generadores de la lluvia ácida. Los plásticos una vez enterrados ocupan un espacio valioso y pueden contaminar las aguas subterráneas por medio de la

---

<sup>95</sup> Se describen sólo algunos efectos ambientales generados por el consumo de agua embotellada, no obstante, conlleva implicaciones en todas las etapas de la economía de materiales.

liberación de ftalatos y otros aditivos tóxicos, según el International Plastics Task Force (Clarke, 2009). El daño colateral que se hace al ambiente se ve reflejado a través de la *alienación del tiempo*, ya que prioritariamente se siguen los ritmos impuestos por el tiempo de la máquina y no los determinados por los ciclos naturales de reabastecimiento del agua, esta devastación ambiental paralelamente va mermando la salud del consumidor.

En *materia sanitaria*<sup>96</sup>, de acuerdo con Clarke (2009, p. 73), se tiene que uno de los *métodos de purificación* del agua que la *industria* utiliza, es la “*ozonación*”, en el cual se genera como subproducto el bromato, sustancia que se sospecha es cancerígena. Asimismo, “el tratamiento por ozono facilita la conversión del bromuro en bromato, el cual, si se ingiere en cantidades significativas, puede tener consecuencias fatales”. En cuestión de una dieta saludable, el agua embotellada que se oferta en los supermercados no es necesariamente la ideal, debido a que al *extraer* todos los *minerales del agua* se tiende a dejar a ésta *exenta* de cualquier *propiedad nutricional*. Esta falta de

---

<sup>96</sup> Se describen sólo algunos efectos sanitarios generados por el consumo de agua embotellada, no obstante, conlleva implicaciones en todas las etapas de la economía de materiales.

aprovechamiento<sup>97</sup> que ofrece el agua, se ve reflejada en la acidificación que se produce en el estómago y en la *deshidratación del organismo* (Duarte, 2017). El daño colateral que se hace al humano se ve reflejado por medio de la *alienación del gusto*, ya que éste al preferir un agua desmineralizada, industrializada y artificial está consintiendo el desgaste de su propia salud.

Como cierre de este cuarto momento (dentro de la articulación del argumento central, Figura 2) se identifican los daños colaterales en materia ambiental y sanitaria que lleva consigo el consumo de agua embotellada y se pone de manifiesto el peligro latente de la reproducción de la vida en la Tierra.

### **3. Consideraciones finales**

Finalmente, la propuesta de estas categorías de análisis –a través de los elementos teóricos referidos– permite mirar desde diversas perspectivas la problemática, en cuanto a que se intenta desmenuzar y detallar los principales actores/ factores que se involucran en la problematización del consumo de agua embotellada en México. De la

---

<sup>97</sup> La pérdida de sales y minerales conlleva a situaciones de hiponatremia –la cual impide el funcionamiento normal del cerebro, los músculos, los órganos y el metabolismo–.

misma manera la propuesta teórica permite evidenciar los procesos de enajenación y alienación que favorecen el consumo de agua embotellada. En seguida se describe de manera sintetizada ambos procedimientos:

### *3.1 Los procesos de enajenación*

El agua pasa de ser un bien natural público a ser un bien natural privado:

- (a) Es con la privatización del agua que se desencadena la pérdida del vital líquido por parte de la comunidad.
- (b) Es con la política de prevención al agua del grifo que se desencadena la pérdida de las formas tradicionales de consumo que se tenían –métodos domésticos de potabilización del agua del grifo–.

De esta manera la propiedad del líquido vital se trasfiere y la desconfianza en el agua del suministro público aumenta.

### *3.2. Los procesos de alienación*

El individuo se subsume a un modo de vida alienado al consumo de agua embotellada:

- (a) Por la percepción de desconfianza que tiene respecto a la salubridad (y/o calidad) del

agua del grifo –impulsada por el Estado–.

- (b) Por la obsolescencia percibida que recibe a través de la demanda manufacturada – generada por la empresa del agua embotellada–.

De esta manera acepta/consiente este nuevo estilo de vida –a través de la compra de agua embotellada–.

Es importante mencionar que, una vez revisado este mosaico de posibilidades teóricas, propuestas como marco referencial para el abordaje de la problemática del consumo del agua embotellada, se sugiere al lector discreción para elegir y adentrarse en los elementos teóricos que más se acerquen a la comprensión de su objeto de estudio. En el caso de la investigación doctoral en curso se decidió darle mayor peso a la perspectiva foucaultiana, ya que sus categorías de análisis permiten tener mayor claridad y un entendimiento integral sobre la problemática que se deseó estudiar. Para dar cierre a este capítulo de revisión, se muestra la Figura 7 para ilustrar la enmarcación teórica que se tiene actualmente de la investigación:



Figura 7. Elementos teóricos del objeto de estudio

## Agradecimientos

La primera autora agradece el apoyo recibido tanto del "Programa Becas Nacionales de Posgrado CONACYT" para la realización de este escrito, como del "Programa Investigadoras e Investigadores COMECYT EDOMÉX" para la publicación del mismo.

## Referencias

Albertani, C. (2004). *Globalización y guerras del agua en México*. Ecuador: América Latina en Movimiento.

- Barrera Sánchez, O. (2011). El cuerpo en Marx, Bourdieu y Foucault. *Iberoforum. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana*, VI (11), 121-137.
- Baudrillard, J. (1981). *For a Critique of the Political Economy of the Sign*. St. Louis, Mo.: Telos Press Publishing.
- Baudrillard, J. (2000). *Las estrategias fatales*. México DF: Anagrama.
- Baudrillard, J. (2009). *La sociedad de consumo: Sus mitos, sus estructuras*. Madrid: Siglo XXI.
- Bauman, Z. (2009). *Trabajo, consumismo y nuevos pobres*. Barcelona: Gedisa.
- Bauman, Z. (2007). *Vida de consumo*. Recuperado de: <https://construcciondeidentidades.files.wordpress.com/2017/11/bauman-vida-de-consumo.pdf>
- Bauman, Z. (2013). *Modernidad Líquida*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Berman, M. (2013). *Todo lo sólido se desvanece en el aire*. México: Siglo XXI.
- Bourdieu, P. (2012). *La Distinción: Criterios y bases sociales del gusto*. Madrid: Taurus.
- Clarke, T. (2009). *EMBOTELLADOS. El turbio negocio del agua embotellada y la lucha por la defensa del agua*. México DF: Itaca.
- Cordera, R. & Tello, C. (2010). *Disputa por la nación perspectivas y opciones del desarrollo*. México DF: Siglo XXI.



- Delgado, G. C. (2014). *Apropiación de agua, medio ambiente y obesidad, los impactos del negocio de bebidas embotelladas en México*. México DF: Colección Alternativas (UNAM).
- Duarte, D. (2017). *Es el agua, ¿Te está enfermando! El mito del agua* [Archivo de video]. México: UNANI Centro. Recuperado de: [www.unanicentro.com/slides/slide/es-el-agua-te-esta-enfermando-el-mito-del-agua-entrevista-a-david-duarte-36](http://www.unanicentro.com/slides/slide/es-el-agua-te-esta-enfermando-el-mito-del-agua-entrevista-a-david-duarte-36)
- Echeverría, B. (2013). *Modelos elementales de la oposición campo-ciudad. Anotaciones a partir de una lectura de Braudel y Marx*. México DF: Ítaca.
- El Financiero. (2013). *Agua embotellada, un negocio en crecimiento en México*. Recuperado de: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/agua-embotellada-un-negocio-en-crecimiento-en-mexico.html>
- Enciso, A. (27 de marzo de 2015). México, el mayor consumidor mundial de agua embotellada. *La Jornada*. Recuperado de: <http://www.jornada.unam.mx/2015/03/27/sociedad/043n1soc>
- Foucault, M. (1990). *Tecnologías del yo y otros textos afines*. Barcelona: Paidós.

- Foucault, M. (1999). El cuidado de la verdad. En *Estética, ética y hermenéutica Obras Esenciales Volumen III* (pp. 369-380). Barcelona: Paidós.
- Fromm, E. (2011). *Marx y su concepto del hombre*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- Harvey, D. (1990). *La condición de la posmodernidad: investigación sobre los orígenes del cambio cultural*. Argentina: Amorrortu editores.
- Harvey, D. (2005). El Nuevo Imperialismo: acumulación por desposesión. *Social Register CLACSO Argentina*, 99-129.
- Hayek, F. (1991). *Los fundamentos de la libertad*. Madrid: Unión Editorial.
- Holloway, J. (1996). Un Capital, Muchos Estados. En Avalos, G. y París, M. D. (Coord.), *Política y Estado en el Pensamiento Moderno* (pp. 351-378). México DF: UAM-Xochimilco.
- Horkheimer, M. (2010). *Crítica de la razón instrumental*. México DF: Editorial Trotta.
- Izquierdo, J. D. D. (1991). *Max Weber precedentes y claves metodológicas*. Castilla-La Mancha: PEREA Ediciones.
- Leonard, A. (2012). *La historia de las cosas*. México DF: Tagus.
- Loaeza, G. (2013). *Compro, luego existo*. México: Océano.

- Marcuse, H. (2010). *El hombre unidimensional*. Barcelona: Ariel.
- Marx, K. (2007). El carácter fetichista de la mercancía y su secreto. En *El Capital I*. México DF: Siglo XXI.
- O'Connor, J. (2002). ¿Es posible el capitalismo sostenible?. En Alimonda, H. (Comp.), *Ecología política. Naturaleza, sociedad y utopía* (pp. 27-52). Buenos Aires: CLACSO.
- Pacheco-Vega, R. (2015). Agua embotellada en México: de la privatización del suministro a la mercantilización de los recursos hídricos. *Espiral*, XXII (63), 221-263.
- Pérez Ramírez, R. (2013). Privatizaciones, fusiones y adquisiciones: las grandes empresas en México. *Espacios Públicos*, 16 (37), 113-140.
- Petrović, G. (1984). Alineación. En Bottomore, T. (Ed.), *Diccionario del pensamiento marxista* (pp.18-25). Madrid: Tecnos.
- Petrović, G. (1984). Reificación. En Bottomore, T. (Ed.), *Diccionario del pensamiento marxista* (pp.494-497). Madrid: Tecnos.
- Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). (2012). *Sistema en línea del registro público de derechos del agua*, CONAGUA. Recuperado de: <http://www.cna.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>

- Restrepo, E. (2008). Cuestiones de método: "eventualización" y problematización en Foucault. *Tabula Rasa*, (8), 111-132.
- Rolland, L. & Vega Cárdenas, Y. (2010). La gestión del agua en México. *Polis: Investigación y Análisis Sociopolítico y Psicosocial*, 6 (2), 155-188.
- Roux, R. (2014). *El Príncipe mexicano*. México DF: Ediciones Era.
- Schumpeter, J. (1934). *The theory of economic development*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Shiva, V. (2003). *Las guerras del agua: privatización, contaminación y lucro*. México DF: Siglo XXI.
- Vásquez Rocca, A. (2008a). Peter Sloterdijk: temblores de aire, atmoterrorismo y crepúsculo de la inmunidad. *Nómadas*, (17), 159-170.
- Vásquez Rocca, A. (2008b). Modernidad Líquida y Fragilidad Humana. *Nómadas*, 19 (3), 1-8.
- Veraza, J. (2008). *Subsunción real del consumo bajo el capital*. México DF: Itaca.
- Weber, M. (2003). *La ética protestante y el espíritu del capitalismo*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Weber, M. (2014). *Economía y sociedad*. México: Fondo de Cultura Económica.

# DISCIPLINAS EMERGENTES

---

DEGRADACIÓN AMBIENTAL  
Y SUSTENTABILIDAD

ADAPTACIÓN AL CAMBIO  
CLIMÁTICO



**HERRAMIENTAS NO  
DESTRUCTIVAS PARA  
EL ESTUDIO DE LA  
DEGRADACIÓN AMBIENTAL  
DEL PATRIMONIO PREHISPÁNICO:  
CASO OXPEMUL, CAMPECHE**

Yolanda Espinosa Morales<sup>1</sup>, Javier Reyes  
Trujeque<sup>2</sup>, Rosario Domínguez Carrasco<sup>3</sup>  
y Verónica Martínez Miranda<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). yespinos@uacam.mx

<sup>2</sup>Centro de Investigación en corrosión, Universidad Autónoma de Campeche. javreyes@uacam.mx

<sup>3</sup>Centro de Investigación Histórica y Sociales, Universidad Autónoma de Campeche. mrdoming@uacam.mx

<sup>4</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). mmirandav@uaemex.mx

## **1. Introducción**

La relación que existe entre el medio ambiente y el deterioro de los materiales pétreos en ambientes tropicales es un hecho ineludible, tal y como ocurre con aquellos vestigios prehispánicos elaborados con roca caliza que se localizan en las zonas tropicales donde floreció la cultura Maya. La cultura Maya fue

una de las principales civilizaciones prehispánicas que creció en un territorio de Mesoamérica de alrededor de 324, 000 km<sup>2</sup>, en lo que actualmente es el sureste de México, Guatemala, Belice y porciones de Honduras y El Salvador (Figura 1) (Vázquez de Ágredos, 2010).



Figura 1. Área geográfica del desarrollo de la Cultura Maya

En la Península de Yucatán, (que incluye los estados mexicanos de Campeche, Yucatán y Quintana Roo), la cultura maya se desarrolló durante el periodo que comprendió entre el 2000 a. C. y 1530 d. C. (Vázquez de Ágredos, 2010). En esta región de México existen sitios arqueológicos de importancia tales como Chichén Itzá y Uxmal (Yucatán), Tulum y Cobá (Quintana Roo) y Edzná y Calakmul (Campeche); este último se encuentra

dentro de la reserva ecológica del mismo nombre, reconocido por la UNESCO como Patrimonio Mixto de la Humanidad desde el Año 2014. Dentro de esta reserva, existen otros sitios arqueológicos, que, aunque no están abiertos al público, son de gran importancia en el desarrollo histórico regional de la civilización Maya, tal es el caso de Oxpemul, que se localiza dentro de la cuenca de Calakmul.

Oxpemul constituyó un centro ceremonial que fungió un papel estratégico en la geopolítica regional controlada por la ciudad estado de Calakmul (Robichaux, 2010), tal y como quedó patente en los registros epigráficos de 21 estelas y 24 altares que ahí se encuentran. Estos vestigios fueron elaborados con roca caliza, que al parecer fue extraído de afloramientos sedimentarios locales, y contienen información histórica sobre el sitio, sus relaciones con ciudades estado como Calakmul y Tikal, así como sobre personajes que representan a gobernantes del lugar (Robichaux, 2010).

Oxpemul se encuentra en plena selva tropical húmeda de Norteamérica, en la cual, las condiciones ambientales son factores naturales clave en el comportamiento de la roca caliza y su susceptibilidad al deterioro físico, químico y biológico (Espinosa, 2017).

Debido a su gran disponibilidad y resistencia al deterioro, desde épocas prehispánicas la roca caliza



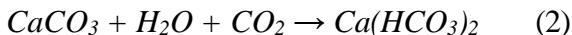
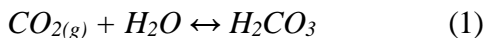
ha sido ampliamente utilizada en la Península de Yucatán como material para la construcción de edificios, en elaboración de esculturas, grabados epigráficos, preparación de estuco modelado, y para la fabricación de cal. Sin embargo, como ocurre con otros tipos de roca, con el paso de los años la caliza tiende a meteorizarse, ya que en las condiciones ambientales actuales de la superficie terrestre de más baja presión y temperatura, presencia de aire y agua, o bajo la acción biológica, se desestabiliza y transforma hasta encontrar un nuevo equilibrio termodinámico y químico, que invariablemente origina cambios en sus propiedades físicas y composición química, lo que conlleva a un proceso de deterioro o hasta su desintegración.

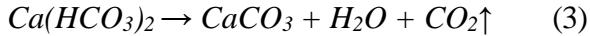
La conservación de los materiales pétreos es un tema de gran interés para diversas instituciones encargadas de la conservación de los bienes patrimoniales de México, por lo que el desarrollo de estudios sobre cómo influye la acción ambiental en los mecanismos de deterioro es una alternativa para desarrollar estrategias para preservar a largo plazo los vestigios históricos del país. En este trabajo, se describe el desarrollo de una metodología para evaluar, mediante métodos no destructivos, la degradación ambiental que presentan las estelas prehispánicas que se encuentran en el Sitio Arqueológico de Oxpeul, Campeche.

### 1.1. El ambiente y la degradación de la roca caliza

La roca caliza es un material de naturaleza sedimentaria compuesta básicamente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), organizado como una estructura en la cual los aniones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) se encuentran en capas intercaladas con cationes de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), también puede contener pequeñas impurezas de arcillas, siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) (Straulino, 2012).

En ambientes tropicales, como en la región selvática de la Península de Yucatán, la humedad relativa es uno de los factores que más influye en la meteorización de la roca caliza, pues esta absorbe dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera y se convierte en una solución ácida, que en el equilibrio puede alcanzar un valor de pH de 5.6 (Bravo *et al.*, 2003). Esto facilita un proceso de solubilización química conocido como Karstificación (Ecuaciones 1, 2 y 3), que convierte a los componentes de la roca caliza en productos solubles que son fácilmente transportados a través del sistema poroso de la roca, donde participan ciclos de disolución y cristalización que debilitan sus propiedades físico-mecánicas.





Las características petrográficas propias de la roca caliza como composición química, textura y porosidad, son parámetros intrínsecos que influyen sobre su estabilidad. Los espacios vacíos proporcionados por los poros constituyen el factor petrográfico más importante frente a la alteración, ya que pueden contener fluidos y en la interfase sólido-fluido ocurren las reacciones químicas que dan lugar a productos de neoformación.

En las rocas porosas influye el volumen de poros abiertos o accesibles al agua, siendo en general más alterables las rocas de mayor porosidad. El tamaño de poros también resulta importante, ya que presentan menor estabilidad aquellas rocas de tamaño de poro pequeño y, por tanto, con mayor superficie específica (Riganti *et al.*, 1991; Che, 2013).

La circulación de agua proveniente de la atmósfera sobre y en el interior de la roca es una de las principales causas de deterioro de edificios y monumentos históricos (Reyes *et al.*, 2009). La estructura porosa de la piedra caliza permite la penetración del agua hacia el interior de la piedra facilitando la disolución de cementantes y la penetración de contaminantes disueltos en el medio

líquido o en estado gaseoso y su acción química (Falcón, 2001; Espinosa, 2013).

En zonas costeras, las sales contenidas en aerosoles marinos participan activamente en los procesos de disolución debido a su alta higroscopicidad. Su efecto también es importante en suelos salinos, ya que el agua rica en sales solubles asciende por capilaridad a través de los poros, y cuando evapora da lugar a la precipitación de las sales disueltas incrementando la presión interna en los poros, lo que origina daños mecánicos. Las sales que muestran fuerte variación en su grado de saturación y aquellos sistemas con fases hidratadas ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), resultan más agresivas, pues son fuertemente afectadas por fluctuaciones ambientales de humedad a través de ciclos de cristalización e hidratación durante variaciones diarias y estacionales (López-Arce, 2008).

La aparición de procesos de disgregación preferencial, fracturas y agrietamientos de la piedra, en muchas ocasiones son consecuencia final de la acción del agua (Elfing, 1995; Gobbi, *et al.*, 1998). Por otra parte, el agua presente en las rocas facilita el desarrollo de microorganismos y organismos superiores que pueden colonizar todo tipo de sustrato y ser notables agentes de alteración (Crispim y Gaylarde, 2004; Alonso *et al.*, 2006;

Escamilla, 2010; Cámara *et al.*, 2011; Escamilla *et al.*, 2012). Las comunidades microbianas que se desarrollan asociadas a los sustratos de roca son en parte responsables de su deterioro físico y químico, y alteran a través de diferentes mecanismos, la apariencia estética y la integridad física del material con el consecuente ensuciamiento y transformación de minerales por la acción de metabolitos secundarios como los ácidos láctico ( $C_3H_6O_3$ ), oxálico ( $C_2H_2O_4$ ), succínico ( $C_4H_6O_4$ ), acético ( $CH_3COOH$ ) o pirúvico ( $C_3H_4O_3$ ) o durante la respiración por la formación de ácido carbónico como resultado de la reacción entre el  $CO_2$ , producto de la respiración, y el agua en las proximidades de la célula (Doehne y Price, 2010; Ortega-Morales, 1999, 2000; Videla, 2000).

### *1.2. La conservación de los vestigios prehispánicos en la selva tropical maya*

En la selva tropical de la región maya, existen numerosos sitios con vestigios prehispánicos construidos de piedra caliza extraída de depósitos sedimentarios locales de los periodos Paleoceno y Eoceno, cuya naturaleza kárstica es consecuencia de la disolución de la roca caliza. Con estos materiales se construyeron impresionantes estructuras arquitectónicas, y se fabricó cal para la

elaboración de obras de estuco modelado que aún perduran en nuestros días. Entre las manifestaciones de arte maya, también se tienen bloques de piedra caliza talladas con símbolo de la escritura maya conocidos como estelas. Estas estelas, que aún pueden ser apreciadas a lo largo y ancho del área donde se desarrolló de la cultura Maya, contienen un complejo conjunto de glifos, que eran laboriosamente tallados en la superficie de la piedra. En ellas se registró información de sucesos acontecidos en los asentamientos mayas, y son un reflejo de la riqueza cultural legada por nuestros ancestros.

Sin embargo, con el abandono de los asentamientos mayas acontecidos hacía el final del periodo postclásico, su inmenso patrimonio quedó a subvención del medio ambiente, fueron cubiertos por la vegetación, lo que hasta cierto punto permitió su conservación. Con las grandes exploraciones arqueológicas del siglo XIX, los rescates y apertura de sitios arqueológicos desarrollados durante el siglo XX, se creó una gran presión ambiental sobre estos vestigios.

Junto con los saqueos, las visitas turísticas masivas y su exposición a agentes naturales y contaminantes del aire, se crean condiciones agresivas que ponen en riesgo estos vestigios prehispánicos, y en consecuencia existe una

creciente necesidad para desarrollar estrategias de conservación, pues en el caso de las estelas, existe un serio riesgo de perder su información epigráfica, debido a los procesos de intemperización, tal y como ocurre en el sitio arqueológico de Oxpemul.

Actualmente las autoridades encargadas de la conservación de los vestigios históricos que forman parte del patrimonio cultural del país enfrentan grandes desafíos relacionados a la problemática del deterioro de monumentos prehispánicos, lo que demandan acciones de conservación preventiva y correctiva ante la diversidad de condiciones ambientales en la que se encuentran.

En la última década se han logrado importantes avances en el diseño de diversas metodologías de evaluación que cumplen con una de las características más importante para el estudio del patrimonio, la capacidad de poder cuantificar y desarrollar un análisis bajo condiciones de campo y generar información cualitativa y cuantitativa que facilite la toma de decisiones para su conservación (LANCIC, 2015). La mayoría de estas técnicas se basan en la medición de fenómenos físicos cuando interactúan con la materia. Entre ellas se tiene las espectroscopias Raman e Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), UV y Fluorescencia de Rayos X (LANCIC, 2015; Barba y Medina, 2016).

En 2011 durante una visita al sitio arqueológico de Oxpemul y como parte de las acciones de la Red de Ciencias Aplicadas a la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural-CONACyT (Barba *et al.*, 2016), se pudo apreciar procesos de intemperización en las estelas prehispánicas haciendo patente la necesidad de evaluar la problemática de su deterioro, por lo que se planteó el desarrollo de estudios para su evaluación y proporcionar información para desarrollar estrategias de conservación a largo plazo. Así es como surgió el proyecto “Diagnóstico de Factores Ambientales que Inciden en el Deterioro de Estelas Prehispánicas del Sitio Arqueológico de Oxpemul, Campeche (Reserva de la Biosfera de Calakmul)”, el cual hace uso de métodos de evaluación no destructivos y no invasivos ideales para el estudio del patrimonio (Espinosa, 2017). A continuación, se detallan la metodología empleada y se discute, sus alcances y su uso como alternativa de estudio científico para determinar el estado de conservación del patrimonio ubicado en zonas tropicales del país.

### *1.3 El sitio arqueológico Oxpemul*

Oxpemul se localiza aproximadamente a 30 Km al noreste de Calakmul, cerca de los límites de dos estados regionales del Periodo Clásico, Río Bec



al norte y Calakmul al sur (Folan *et al.*, 2009), Figura 2. Está organizado alrededor de dos grupos ceremoniales (Figura 3 y 4), el núcleo más grande, grupo norte (5 ha y 300 m.s.n.m), posee un palacio, un grupo E con edificios que recuerdan a los de Calakmul y un juego de pelota. En este grupo existen además 19 estelas y 19 altares. El segundo núcleo se encuentra a 1.2 Km al sur-sureste del grupo principal (3 ha y 250 m.s.n.m.) En este grupo hay unos 15 edificios además de 2 estelas y 2 altares (Figuras 3 y 4) (Folan *et al.*, 2005; Spraj *et al.*, 2005).

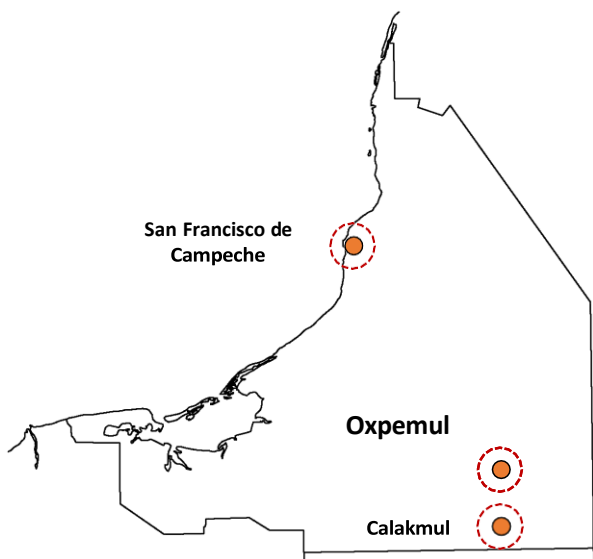
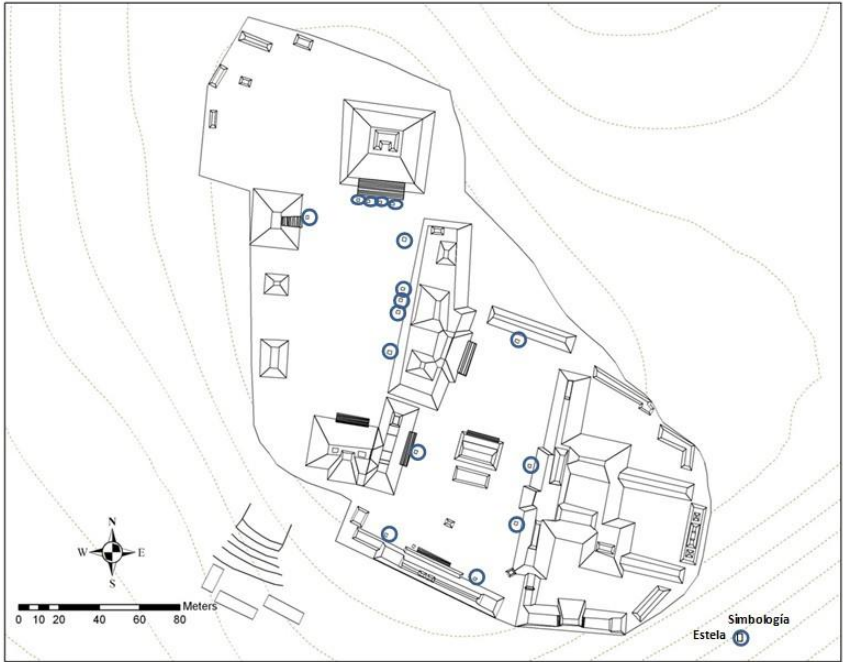


Figura 2. Ubicación del sitio arqueológico de Oxpemul, Campeche

De acuerdo con estudios realizados en elementos cerámicos, se reporta una ocupación para el sitio desde el Preclásico Medio (1200-400 a. C) hasta el Clásico Terminal (750 - 1050 d.C) (Domínguez-Carrasco, 1994 y 1995). Las estelas de Oxpemul, muestran figuras humanas y textos jeroglíficos que hacen referencia a linajes de gobernantes, deidades y relaciones de interdependencia con ciudades estado de la región como Calakmul y Tikal (Spraj *et al.*, 2005; Robichaux, 2010; Domínguez *et al.*, 2011) (Figura 5).

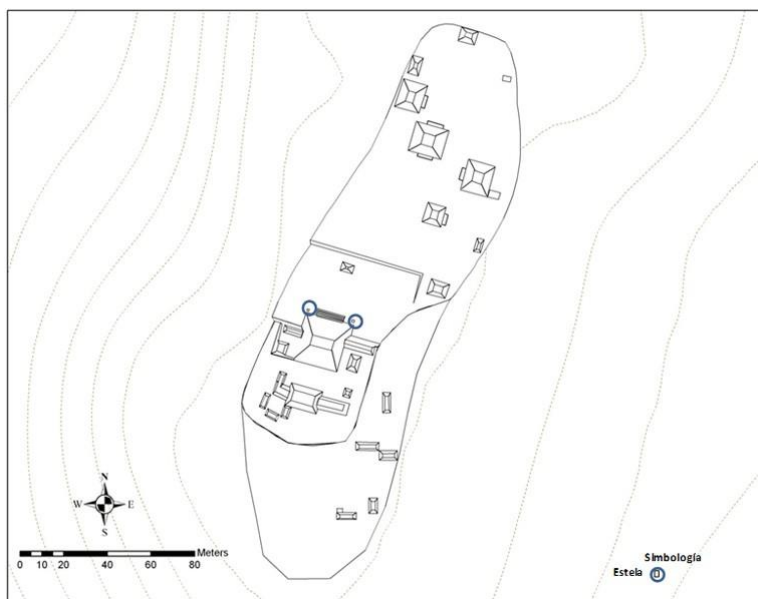
El sitio se encuentra dentro del núcleo de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, en un ambiente prístino, mínimamente modificado por la actividad antrópica, El clima del sitio arqueológico es de tipo subhúmedo con lluvias en verano. De acuerdo con estudios realizados en la región de Calakmul, se tiene una media de precipitación anual de 1076.2 mm y una temperatura media de 24.6°C (Martínez y Galindo-Leal, 2002).

La vegetación que rodea ambos grupos arqueológicos pertenece a los tipos de selva baja y mediana subperennifolia. Estas características ambientales mantienen a estelas y estructuras que ahí se encuentran, a una constante meteorización.



Fuente: Folan *et al.*, 2009

Figura 3. Grupo norte en el sitio arqueológico de Oxpemul, en él se observan los edificios principales y en círculos azules las estelas que posee



Fuente: Folan *et al.*, 2009

Figura 4. Grupo sur en el sitio arqueológico de Oxpemul, en él se observan los edificios principales y en círculos azules las estelas que posee



Figura 5. Estelas IV (a) y V (b) del grupo norte y estelas XVIII (c) y XIX (d) del grupo sur, en el sitio arqueológico de Oxpemul Campeche

## 2. Materiales y Métodos

En 2016, se realizó una inspección preliminar en el lugar para evaluar la susceptibilidad de desarrollar un estudio sobre la degradación de las estructuras del sitio arqueológico, y en su caso, seleccionar piezas representativas para establecer un procedimiento sistematizado de evaluación que posteriormente pudiera aplicarse en toda el área. Durante la visita, se establecieron los protocolos de evaluación de estelas IV y V del Grupo Norte y XVIII y XIX del Grupo Sur.

El estudio del patrimonio histórico necesariamente requiere del empleo de técnicas de evaluación conservativas, no invasivas, y en el caso de sitios ubicados en ambientes naturales de portabilidad. La propuesta metodológica incluyó el empleo fotografía digital (FD), termografía digital (TD), luminiscencia visible inducida por luz ultravioleta (LUV), y las técnicas espectroscópicas de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y por Fluorescencia de rayos X (FRX) (Figura 6).

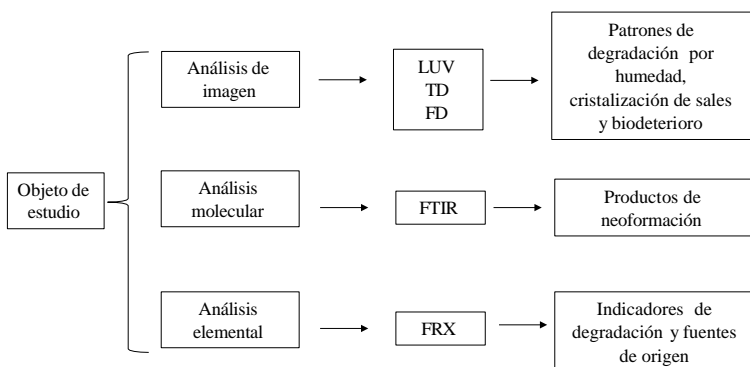


Figura 6. Propuesta metodológica aplicada durante el estudio

### 3. Resultados y discusión

Una de las primeras aproximaciones en la evaluación de monumentos es la fotografía digital, ya que a través de ella se puede registrar rasgos de los mecanismos de degradación perceptibles a simple vista. El registro fotográfico es la herramienta básica de la evaluación megascópica, la cual permite resaltar como ya se mencionó previamente, las particularidades de los procesos de deterioro y es un auxiliar en la identificación de sus patologías.

Los estudios sistemáticos en el sitio arqueológico dieron inicio en 2017, con la realización de un registro fotográfico de las estelas, con la finalidad de facilitar su evaluación

megascópica y determinar las principales estructuras meteorizadas. Estas últimas pueden ser descritas a detalle mediante el empleo de la metodología de inspección visual propuesta por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS, por sus siglas en inglés) en el 2010, la cual clasifica las patologías de deterioro en cinco grupos principales (ICOMOS, 2010):

- a) Grietas y deformaciones: las grietas son estructuras de meteorización individualizadas claramente visibles a simple vista que suponen separación entre las dos partes; a su vez, una deformación implica cambio en la forma sin pérdida de la integridad que se manifiesta por torsiones o pandeos.
- b) Desprendimientos: elevaciones semiesféricas rellenas de aire en la superficie de la piedra como resultado del desprendimiento de la lámina exterior.
- c) Formas inducidas por pérdida de material: pérdida de la superficie original, con suavizado de las formas.
- d) Alteraciones cromáticas y depósitos: la cromática es la modificación del color de



la piedra en uno de los tres parámetros de color: tono, luminosidad y saturación. El tono corresponde a la característica más señalada del color (azul, rojo, amarillo, naranja, etc.). La luminosidad corresponde a la oscuridad (tonos bajos) o brillo (tonos altos) de un color. La saturación o cromatismo corresponde a la pureza de un color, desde vivos a apagados.

El depósito es la acumulación de material exógeno de espesor variable. Algunos ejemplos de depósitos son: salpicaduras de pintura o mortero, aerosoles marinos, partículas atmosféricas tales como hollín o polvo, restos de productos o materiales utilizados en restauración tales como apósitos de pasta de celulosa, restos de abrasivos utilizados en la limpieza, etc.

- e) Colonización biológica: colonización de la piedra por plantas y microorganismos tales como bacterias, cianobacterias, algas, hongos y líquen (este último es una simbiosis de los dos anteriores). La colonización biológica también incluye influencias por otros organismos tales como nidos de insectos y animales sobre y dentro de la piedra.

Es conveniente resaltar que las causas de los daños que se pueden presentar en las estructuras históricas expuestas al ambiente guardan una estrecha relación con las propiedades de sustrato pétreo y el efecto de los agentes del clima y las características químicas de la atmósfera circundante que controlan los procesos de intemperización.

Tabla 1. Patologías observadas en las estelas del sitio arqueológico de Oxpemul

Patología	Familia ICOMOS	Estela IV	Estela V	Estela XVIII	Estela XIX
Grietas	Grietas y deformaciones	Observado	Observado	No se observa	No se observa
Ampollas	Desprendimiento	Observado	No se observa	No se observa	No se observa
Fragmentación	Desprendimiento	Observado	Observado	Observado	Observado
Microkarstificación	Rasgos inducidos por pérdida de material	Observado	Observado	Observado	Observado
Eflorescencia	Alteración cromática y depósito	Observado	No se observa	No se observa	No se observa
Biopátinas (Algas, líquenes, musgos)	Colonización biológica	Observado	Observado	Observado	Observado

La Figura 7 muestra algunos ejemplos de las patologías de deterioro que se pueden apreciar sobre la superficie de las estelas IV, V, XVIII y XIX del sitio arqueológico de Oxpemul. La Tabla 1 muestra los indicadores de degradación, clasificados de acuerdo a la nomenclatura del ICOMOS, encontrados en las estelas. Las consecuencias finales

de la intemperización son la pérdida de propiedades físicas que llevan a la destrucción de cualquier estructura pétreo. Esto es crítico para las estelas de Oxpepul, debido a que en ellas se encuentran registros epigráficos importantes para entender la dinámica geopolítica, social y religiosa del lugar.



Figura 7. Mecanismos de degradación observados en las estelas del sitio arqueológico de Oxpepul, Campeche

Un aporte de esta investigación es el empleo de técnicas de análisis fotográfico complementarias como la luminiscencia inducida por luz ultravioleta (LUV) o la termografía digital (TD).

La LUV es una técnica de evaluación que se basa en inducir el fenómeno de fluorescencia en condiciones de baja luminosidad sobre una superficie

que es expuesta a radiación ultravioleta de onda corta (254 nm) o larga (365 nm) y el registro de su luminiscencia empleando una cámara fotográfica con tiempos de exposición largo. Debido a que su uso solo requiere de lámparas especiales de luz ultravioleta y cámara fotográfica, es considerado un método de evaluación no invasivo y no destructivos.

Esta técnica es empleada normalmente en el estudio de obras de arte como pintura de caballete o pintura mural, para resaltar los detalles técnicos del artista, identificar materiales e intervenciones. También se puede utilizar en estudios mineralógicos y gemológicos.

En esta investigación, se hace una interesante propuesta para emplear la técnica LUV, por primera vez en México, en condiciones ambientales exteriores y desarrollar un registro de la evolución superficial de las áreas de colonización de comunidades microbianas que crecen sobre la superficie de las estelas de Oxpemul, en relación con variaciones estacionales ambientales para establecer patrones de deterioro. Esto basado en el principio de que los materiales orgánicos pueden presentar luminiscencia, por lo que la biomasa microbiana presentará su propia huella fluorescente, y su superficie de colonización mostrará expansiones y contracciones estacionales como consecuencia de la disponibilidad de nutrientes para su crecimiento

durante los diferentes ciclos estacionales, lo que puede ser registrado mediante la fotografía LUV.

La Figura 8, que corresponde a la parte central de la estela XVIII es un ejemplo de su utilidad. En ella se pueden apreciar diferentes tonos luminiscentes zonas de color blanco brillante, negro, rojo y azul, los cuales parecen corresponder con grupos específicos de microorganismos que crecen sobre las estelas. Siguiendo este esquema, se desarrollaron fotografías LUV de carácter general abarcando toda la superficie de esta estela, en diferentes periodos estacionales (Figura 9).

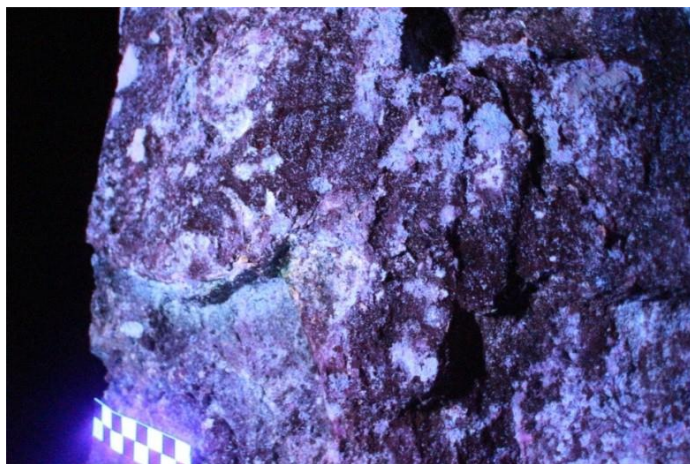


Figura 8. Luminiscencia de la materia orgánica en la estela XVIII

Las áreas de expansión y contracción de las comunidades microbianas desarrolladas sobre su superficie siguen un patrón estacional, que coincide con los periodos de mayor disponibilidad de agua. La Figura 9 a y c, corresponde al mes octubre de 2018, al final de la temporada de lluvias, mientras que, la Figura 9b y d, corresponde a mayo de 2018, al final de la estación seca. En esta última, las áreas oscuras que crecen hacia la parte superior de las estelas tienden a ser mayores, lo que se relaciona con el crecimiento de líquenes de metabolismo fototrófico, los cuales se desarrollan en condiciones de mayor exposición a la radiación solar y de mayor estrés hídrico, lo que a su vez les proporciona mayor capacidad de resistencias en condiciones de baja humedad. Estos líquenes suelen estar asociados a productos de degradación como whewellita y weddellita, que son producto de la disolución del sustrato calizo al reaccionar con el ácido oxálico producido por estos microorganismos.

mayo 2018



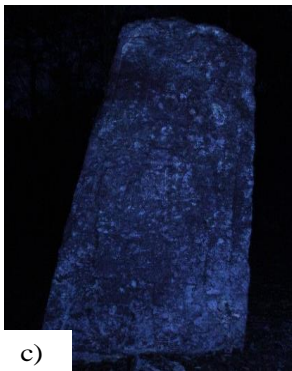
a)

Imagen LUV



b)

Imagen visible



c)

octubre 2018



d)

Figura 9. Técnica de luminiscencia inducida con luz UV (365 nm) en la estela XVIII

La acción de la humedad condiciona el crecimiento microbiano, es un factor crítico en los procesos de disolución/cristalización de sales de origen externo y de componentes minerales propios

del material pétreo. Sus efectos inmediatos son la formación de una costra de deterioro externa que contribuye a la pérdida de masa superficial de la roca, o a la cristalización en el interior de la roca como consecuencias de procesos bidireccionales de difusión y cristalización de sales, las cuales genera presiones internas que tienden a formar microgrietas que con el tiempo causan pérdida de propiedades mecánicas en la piedra y su fragmentación.

En este sentido, el conocimiento de los ciclos de humectación natural que afecta a una estructura pétreo permite determinar las áreas críticas sobre las cuales se formaran sus productos del deterioro ambiental, y al mismo tiempo permite evaluar los periodos en los cuales la estructura es más susceptible al deterioro.

La termografía digital, es un método de evaluación fotográfica óptica que se basa en el principio de que todo objeto que absorbe calor lo restituye al ambiente como radiación infrarroja. Con una cámara fotográfica especial con sensores infrarrojos, y considerando la distancia al objeto y la radiación que absorbe el aire y la humedad atmosférica, se pueden realizar un mapeo térmico superficial del objeto que permita relacionar las diferencias térmicas con el contenido de humedad, estas imágenes pueden ser mejoradas empleando diversos filtros digitales. A pesar de que está técnica



ha sido aplicada sistemáticamente por diversos grupos de investigación en Europa (Pérez y García, 2010), como herramienta de evaluación para el estudio del comportamiento hídrico en monumentos históricos, en México su uso es apenas incipiente. En este sentido, se carece de referencias de su empleo en estructuras históricas dentro de ambientes selváticos naturales.

Debido a que la termografía digital es una técnica portátil, de carácter no invasivo y no destructiva, resultó ideal para evaluar la temperatura superficial de las estelas prehispánicas de Oxpemul, y determinar patrones de humedad estacionales. Considerando que, en la región selvática de Calakmul, existen fundamentalmente dos estaciones, la lluviosa (que va de junio a octubre) y la seca (que va de noviembre a mayo), se realizaron evaluaciones termográficas trimestrales de la superficie de las estelas.

La Figura 10 muestra las imágenes termográficas, obtenidas durante la evaluación de la estela XVIII, las cuales corresponden a los meses de diciembre de 2017 y mayo de 2018, al inicio y final de la estación seca.

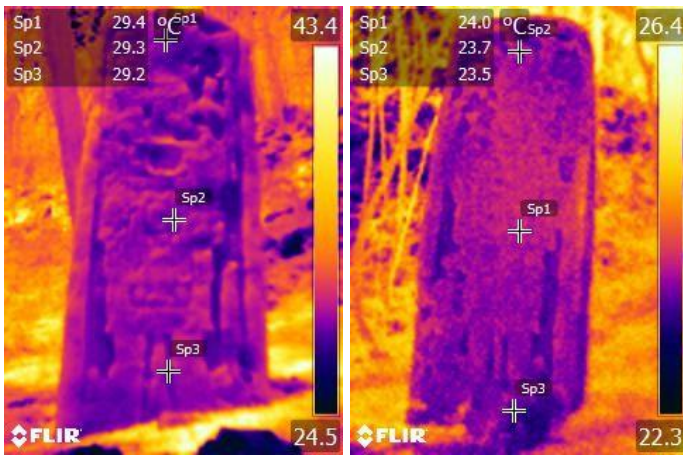


Figura 10. Análisis termográfico en la estela XVIII en diciembre 2017 y mayo 2018 respectivamente

En el primero de los casos, se puede apreciar una distribución homogénea en la temperatura superficial, que se diferencia claramente del fondo ambiental. Esto puede estar relacionado con un cierto nivel de saturación de agua.

Lo anterior, podría estar relacionado o indicaría 1) la predominancia de procesos de disolución de componentes solubles de la estela, 2) un equilibrio entre los procesos de absorción capilar proveniente del suelo y de absorción de humedad proveniente del aire consecuencia de los continuos procesos de humectación superficial ocurridos durante la recientemente concluida estación lluviosa y 3) el incremento de la humedad ambiental que ocurren durante el periodo invernal en la región, ante la

disminución de la temperatura ambiental y la llegada de frentes fríos provenientes del Golfo de México.

Por otra parte, el mapeo termográfico correspondiente al mes de mayo presenta algunas diferencias con respecto a lo observado en diciembre. Las áreas en contacto con el suelo presentan menores valores de temperatura, con respecto a la parte superior (diferencia térmica de 0.5 °C.) Así mismo se puede apreciar menor gradiente térmico con el suelo. Esto puede ser indicador de procesos de absorción capilar desde el suelo y de la activación de los procesos de disolución de componentes solubles de la roca en estas áreas de mayor humedad. Por otra parte, en áreas de mayor temperatura (y menor humedad), es posible la aparición de eflorescencias.

Las eflorescencias pueden ser analizadas con métodos espectroscópicos como la Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR), una técnica de análisis molecular útil para la identificación de grupos funcionales de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos.

Esta técnica, que se basa en la absorción de energía electromagnética en la región infrarroja por parte de los enlaces que constituyen estructuras moleculares, ha sido ampliamente utilizada en el estudio de piezas históricas como pinturas

prehispánicas y coloniales, productos de degradación ambiental en materiales intemperizados como metales, pétreos, materiales cerámicos, (Arroyo *et al.*, 2008, Espinosa, 2013; Arceo, 2015). Entre los compuestos que pueden ser identificados se tienen: pigmentos, aglutinantes, aceites, resinas, gomas vegetales, materiales proteicos, minerales, óxidos metálicos (Arroyo *et al.*, 2012).

Las eflorescencias, son productos de meteorización que pueden ser observados sobre la superficie de las estelas. Son fuente de información valiosa para entender los mecanismos de degradación predominantes e identificar fuentes naturales o antrópicas de los compuestos químicos que las originan (Espinosa, 2013; Silva, 2015). El uso de un espectroscopio FTIR acoplado a módulo de Atenuancia Total Reflejada (ATR), permitió analizar porciones de muestras retiradas de la estela XVIII de apenas unos cuantos mg.

La Tabla 2, muestra una relación de los grupos funcionales identificados mediante FTIR, así como sus frecuencias de absorción IR características. Por su parte, la Figura 11, muestra el espectro FTIR correspondiente. Las frecuencias de absorción encontradas están asociadas a la calcita, componente principal de la roca caliza. Adicionalmente, se observaron frecuencias de absorción característica de oxalatos de calcio, Whewellita y Weddellita,

productos de la actividad metabólica de microorganismos que crecen sobre la superficie de las estelas, así como lacaolinita, probablemente formada como consecuencia de los propios procesos de meteorización (Figura 11).

Tabla 2. Grupos funcionales identificados en las muestras de líquenes que fueron retiradas en la estela XVIII del sitio arqueológico de Oxpepul, Campeche

Enlace	cm <sup>-1</sup>	Compuesto asociado
C=O	876, 1422, 1431	Calcita (CaCO <sub>3</sub> )
C=O	1527, 1644, 2353	Whewellita (CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> •H <sub>2</sub> O)
C=O	1325	Weddellita (CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O)
Si-O	3623, 3735	Caolinita (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )

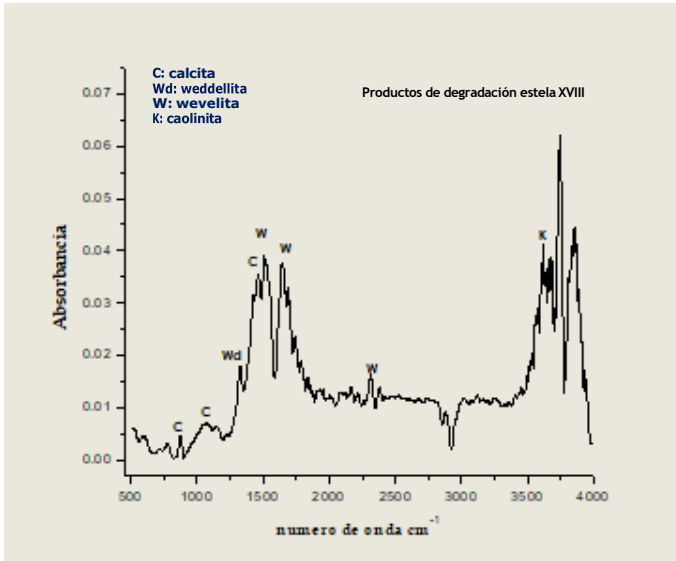


Figura 11. Espectro FTIR de productos de degradación retirados de la estela XVIII del sitio arqueológico de Oxpemul, Campeche

Otro método de análisis que permite obtener información de indicadores de degradación ambiental fue la espectroscopía de Fluorescencia de Rayos-X (FRX). Esta técnica de análisis elemental resulta ideal en la identificación de elementos traza, y es importante en la asignación de fuentes de origen de marcadores de procesos naturales y antrópicos que pueden causar el deterioro de la piedra. Por su naturaleza no destructiva, esta técnica es ampliamente utilizada en el análisis de piezas del patrimonio histórico como cerámicas, retablos, pinturas de caballetes, códices, pintura mural,

metales y materiales pétreos (LANCIC, 2015; Barba y Medina, 2016).

La Figura 12, muestra espectros FRX de la matriz pétreo y de muestras de productos de degradación retirados de la estela XVIII. Los resultados permitieron identificar como elementos mayoritarios de la matriz pétreo al calcio (Ca), seguido del hierro (Fe), estroncio (Sr) y silicio (Si), todos ellos contenido en la roca madre. Por otra parte, fue posible observar en los productos de degradación elementos como el azufre (S), potasio (K), bario (Ba), bromo (Br) y magnesio (Mg) como elementos minoritarios, al parecer todos ellos contenidos en la roca madre original, por lo que su presencia en la superficie puede ser consecuencia de procesos de disolución/cristalización de los componentes de la piedra caliza. Por su parte la presencia de cloro (Cl) en los productos de degradación, revelan la contribución de aerosoles marinos depositados en la superficie de la estela.

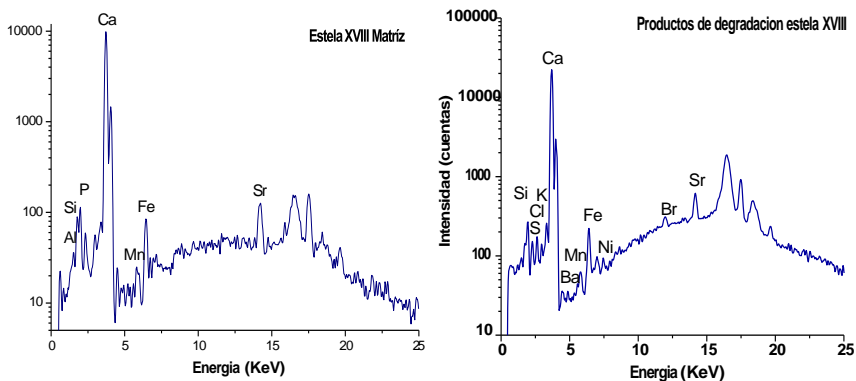


Figura 12. Espectros FRX de la matriz y productos de degradación de la estela XVIII

#### 4. Conclusiones

En la actualidad existen un conjunto de técnicas analíticas, que resultan de utilidad para el estudio del patrimonio construido en ambientes naturales. En este trabajo se emplearon métodos de evaluación no destructivos, no invasivos y portátil, de fácil acceso y que pueden ser empleados por grupos de investigación del país en los esfuerzos que se realizan para conservar el patrimonio histórico.

Los resultados obtenidos en las estelas prehispánicas del sitio arqueológico de Oxpemul, arrojan datos preliminares sobre la acción ambiental en los procesos de deterioro del material calizo con que fueron fabricadas las estelas. Se establecieron patrones de degradación con base al uso de técnicas



de análisis de imagen y se identificaron indicadores de degradación ambiental empleando técnicas de análisis elemental y molecular, de lo anterior se concluye que existe un importante componente natural en los mecanismos de deterioro químico y biológico que afectan a las estelas en zonas selváticas de México.

Finalmente es conveniente resaltar el enorme reto que enfrenta nuestro país, para desarrollar estrategias de rescate y conservación del patrimonio construido en zonas tropicales, dada la complejidad de los fenómenos ambientales que ahí ocurren. En este sentido las herramientas de trabajo aquí presentadas pueden ser incluidas en futuros protocolos de medición para estudiar los procesos de degradación ambiental en estas regiones de México.

Se presenta una metodología de evaluación de fácil acceso y probada utilidad que permitió generar información sobre la intemperización de la roca caliza de las estelas de Oxpemul. Con la ayuda de técnicas de análisis avanzadas como las que fueron usadas en esta investigación es posible realizar análisis confiables y generar datos para el desarrollo de estrategias de conservación para piezas de interés histórico en nuestro país.

## **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo al Proyecto Arqueológico Oxpemul, a la Red de Ciencias Aplicadas a la Investigación y Conservación de Patrimonio Cultural, al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC), al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), a los hermanos Jacinto y Gonzalo Gómez Jiménez (custodios del sitio), al Lic. Raymundo González Heredia y a la Ing. Karla Hernández Vázquez.

## **Referencias**

- Alonso, F. J., Esbert, R. M., Ordaz, J., Vazquez, P. (2006). Analysis of Stone material damages in buildings. *Recopar*, 3, 23-32.
- Amoroso, G.G., Fassina, V. (1983). Stone decay and conservation: Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. *Material Science Monograph*, 11, 453.
- Barba Pingarron, L., Medina Gonzalez, I. (2016). Construyendo puentes interdisciplinarios: la red de Ciencias Aplicadas a la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural (Red-

- CAICPC), México. Intervención, ISSN-2448-5934, No. 14:60-70.
- Benavente, D. (2007). La cristalización de sales como mecanismo de deterioro en rocas usadas en el patrimonio arquitectónico. Ciencia, tecnología y sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo. E.M. Pérez-Monserrat, M. Gómez-Heras, M. Alvarez de Buergo y R. Fort (eds). Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro, S.S. de los Reyes, pp.33-44.
- Bravo, A.H., Soto, R. Sanchez, P. (2003). Efectos de la lluvia ácida en el material constituyente de monumentos mayas mexicanos. Ingeniería Investigación y tecnología 195205.
- Cámara, B., De los Rios, A., Urizal, M., Alvarez de Buergos, M., Varas, M. J., Fort, R., Ascaso, C. (Characterizing the Microbial Colonization of a Dolostone Quarry: Implications for Stone Biodeterioration and Response to Biocide Treatments. Microbial Ecology. Vol. 62, Issue 2, pp. 299-313.
- Che, I., Reyes, J., Pérez, T., Corvo, F. (2013). Uso de cámara de ensayos acelerados para el estudio de la degradación de materiales en Patrimonio Cultural y Natural. Experiencias
- Crispim, C.A., Gaylarde, C.C. (2004). Cyanobacteria and Biodeterioration of Cultural

- Heritage: A review. *Microbial Ecology*. Vol 49 pp. 1-9.
- Doehne, E., Price Clifford, A. (2010). *Stone Conservation, An Overview of Current Research. Research in conservation*. Segunda edición. ISBN: 978-1-60606-046-9.
- Domínguez Carrasco, M.R. (1994). *Calakmul, Campeche, Un análisis de la cerámica*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche (Colección Arqueológica, 4).
- Domínguez Carrasco, M. R. (1995). *La cerámica de Calakmul, Campeche: una visión de su secuencia cronológica y cultural*, *Los investigadores de la cultura Maya*, 3(II): 503-521. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Dominguez Carrasco. M. R., Puc Tejero, L. del C., Folan Higgins, W.J. (2011). *Oxpemul, Campeche: un acercamiento a la temporalidad de su asentamiento*. *Estudios de la Cultura Maya*. Vol. XXXVII. ISSN 0185-2574. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escamilla Pérez, R. G. (2010). "Identificación de microorganismos relacionados con el Biodeterioro del baluarte de San Carlos, de la ciudad de San Francisco de Campeche, México." Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Campeche.

- Escamilla Pérez, R. G., Reyes Trujeque, J., Pérez López, T., Monteon Padilla, V., López Alcántara, R. (2012). Identification of microorganisms Associated to the biodegradation of historic masonry structure in San Francisco de Campeche city, México. Cultural Heritage and Archaeological Issues in Materials Science. Vol. 1374, pp 187-194.
- Espinosa, Y. (2013). Análisis del deterioro por cristalización de sales de materiales constituyentes de los mascarones de estuco policromado de la zona arqueológica de Edznà. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Investigación en corrosión.
- Espinosa Morales Y. (2017). Diagnóstico de factores ambientales que inciden en el deterioro de Estelas prehispánicas del Sitio Arqueológico de Oxpeumul, Campeche (Reserva de la Biosfera de Calakmul). Proyecto doctoral. Facultad de química, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Elfing, p. (1995). The initial steps in the air pollution induced deterioration of calcareous Stone. R. Pancella, Ed. Proceeding of the 1995 LCP congress.
- Falcón Álvarez, T. (2001). El patrimonio arqueológico de Campeche: Estudio de las pinturas murales de Ichmac, Xuelén y Chelemi.

La Pintura Mural Prehispánica en México. II Área Maya. Tomo III. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Estéticas.

Folan, W.J., González Heredia, R., Morales Lopéz, A., Dominguez Carrascos, M.R., Zamora Cresencio, P., Barnes, B. E., Robichaux, H., Anaya Hernandez, A., Gunn, J. D., Pruett, C. (2009). Las Ruinas de Oxpemul: un sitio fortificado en la frontera entre el Petén Campechano y el Rio Bec.

Gobbi, G., Sabrioni, C., Zappia, G., (1998). Sulphite quantification on Damaged Stone and mortars Atmospheric Environment, 32 (4), 783-789.

ICOMOS-ISCS (2010): Glosario Ilustrado de formas de deterioro de la piedra. Comité internacional de la piedra ICOMOS. Edición. ICOMOS ISCS, Veronique Verges- Belmin.

LANCIC: Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC), México. Intervención, ISSN-2007-249X), año 6, No 12:77-84.

López- Arce, P. (2008). Deterioro de edificios históricos por acción de las sales. Instituto tecnológico de Rocas ornamentales y materiales de construcción (INTROMAC), junta de Extremadura, pp. 83-104.

- Martínez, E., Galindo Leal, C. (2002). La vegetación de Calakmul, Campeche, México: Clasificación, Descripción y Distribución. Boletín de la Sociedad Botánica de México. ISSN. 0366-2128.
- Ortega-Morales, O., Hernandez-Duque, G., Borges-Gomez, Guezenec, J. (1999) Characterization of Epilithic Associated with Mayan stone Monuments in Yucatán, México. Volume 16, 1999 – Issue 3.
- Reyes, J. Bartolo, P. Cauich, W. Huerta, D. Hermosin, B. Perez, T. (2009). Analisis morfológico y químico de costras de deterioro de Edificios Históricos mediante SEM/EDX. Acta microscópica vol.18.
- Riganti, V., Spechiarello, M., Rosseti, R., Tortelli, M., Vaniela, F., Zezza, U. (1991). Air pollution and microclimate influences on Stone decay of monuments in urban and extra urbana reas (pavia, Lombardy, Italy). Conservation of stone and other materials, 1197203.
- Robichaux, H. R. (2010). The Ancient Maya Monumentes at Oxpemul, Campeche, México. Informe del proyecto arqueológico Oxpemul. Centro de Investigaciones Históricas y Sociales. Universidad Autónoma de Campeche.
- Silva Leon, I., Reyes, J., Pérez, T., Alonso, E., Bartolo-Pérez, P. (2015). Stratygraphyc Análisis of Weathering Cursts From the Historic Bastion

- of San Pedro, Campeche (XVIII Century). *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1628, (233-240). Material Research Society.
- Sprajc, I., Folan, W. J., González Heredia, R. (2005). Las ruinas de Oxpemul, Campeche: su redescubrimiento después de 70 años en el olvido (1934-2004). *Los investigadores de la Cultura Maya* 13. Tomo 1. 1-26.
- Straulino Mainou, L. (2012). El intemperismo de calizas en monumentos prehispánicos mayas. El caso de la cornisa del edificio 5N2, Rio Bec. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*. Vol 64, num 1, p. 49-60.
- Vázquez de Ágredos, M.I., (2010). La pintura Mural Maya, materiales y técnicas artísticas. Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición. ISBN:978-607-02-1500-1
- Videla, H. A., Guiamet, P. S., Gómez de Saravia S. G. (2000). Biodeterioro de Materiales o Corrosión atmosférica: una dicotomía ficticia. Dos casos prácticos de biodeterioro del patrimonio cultural Maya, En: *Biodeterioro en Monumentos Históricos de Iberoamérica*.
- Videla Héctor A. (Edit) CYTED Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Sevilla, España. 1-18.





# **VULNERABILIDAD DE GÉNERO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: LOS RETOS DE MÉXICO ANTE LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN**

Ana Luz Quintanilla Montoya<sup>1</sup>, Rocío Sinaíd  
Álvarez Cervantes<sup>2</sup> y Evelyn Rodríguez Morrill<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima.  
analuzqm@ucol.mx

<sup>2</sup>Facultad de Biomédicas, Universidad de Colima.  
sinaid2000@gmail.com

<sup>3</sup>Facultad de Psicología, Universidad de Colima.  
evelynrm@ucol.mx

## **1. Introducción**

El cambio climático global (CCG) es el reto más grande que tenemos que confrontar los seres vivos durante el presente siglo y alude a una variación del clima en el planeta, generada por la acción exclusiva de una especie: el ser humano. Éste es producido por el proceso conocido como efecto invernadero, que provoca el llamado calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, es bueno establecer las diferencias entre dos términos importantes, que con frecuencia son considerados iguales: “la variabilidad del clima” y el

“cambio climático global”, o como muchos científicos lo definen hoy en día “cambio climático antropogénico”, debido a que, si el clima ha cambiado, ha sido como respuesta de la naturaleza a los enormes impactos ambientales que hemos ocasionado los seres humanos sobre nuestro planeta (Quintanilla-Montoya, 2019).

Aun cuando el clima ha variado a lo largo de toda la historia de nuestro planeta, de manera natural, la gran diferencia en las variaciones debido a la emisión de gases de efecto invernadero—parecen darse sobre todo a partir de la Revolución Industrial, a finales del siglo XIX. Fue entonces cuando los seres humanos empezamos a causar impactos mayores en nuestro entorno, debido a la generación de energía eléctrica mediante el uso de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y deforestación para la producción de productos cárnicos, el incremento de la población de manera desmedida pasando de 1.5 mil millones en 1900, a 7.7 mil millones en la actualidad (Worldometer poblacional, 2019), el consumo dispendioso promovido por una economía basada en el capitalismo, entre otros factores más, los cuales nos mantienen en una situación sumamente delicada en términos de conservar la vida en el planeta, no sólo la nuestra sino la de miles o millones de especies que como nosotros lo cohabitan.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en inglés), que depende de la ONU, publicó primero en septiembre 2013 el Reporte del Grupo de Trabajo 1, sobre los impactos físicos; a fines de marzo 2014 el Reporte del Grupo 2, acerca de la necesidad de adaptación y, en octubre, el Reporte del Grupo 3, sobre las medidas de mitigación ante el cambio climático. Los resultados de los tres Reportes (IPCC, 2013, 2014a y 2014b) son abrumadores y reportan cambios importantes en todo el planeta, algunos generalizados y otros ya irreversibles. MunichRe en 2016 (citado por Oswald, 2016), divulgó los impactos de los desastres en 2015 con 23 000 muertes y en 2014, con 7700. Durante las pasadas tres décadas, el número de muertes ascendió a 54 000 y sólo la onda de calor en Paquistán e India causaron 3670 muertes, mientras que en Europa murieron 1250 personas (Oswald, 2016).

Las temperaturas globales de la superficie terrestre aumentaron en una cifra récord de 2014 a 2016, elevando la temperatura media desde 1900, a más de 0,8 °C. Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un intervalo probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa

aumentando al ritmo actual (IPCC, 2019). Walther *et al.* (2002) comentaba ya entonces, que la tasa de elevación de la temperatura media global, había sido la más alta durante los últimos 1000 años y Yin *et al.*, (2018) mostró que el aumento de la temperatura global, que fue de 0,24 °C, desde 2014 hasta 2016 no tenía precedentes en los siglos XX y XXI. El incremento de la temperatura debido al CCG, está afectando ya los sistemas biofísicos; determinados sistemas naturales son particularmente más vulnerables (bosque de manglares, pequeñas islas, áreas costeras, por mencionar algunos). Asimismo, existen problemas asociados a la salud ambiental, el estrés hídrico, el incremento de vectores y enfermedades de transmisión por agua. Estos escenarios muestran una mayor predisposición de enfermedades en las mujeres, que en los hombres debido a que el acceso a los servicios médicos, son mayores en hombres que mujeres (Nelson *et al.*, 2002).

Por otro lado, existe una amplia evidencia de cómo el CCG ha afectado una extensa variedad de organismos en distintas distribuciones geográficas. Las consecuencias de ello se han registrado durante 30 años, con graves resultados, desde la década de los años 60's, respecto a las respuestas en fenología, fisiología de los organismos, distribución de las especies, la composición e interacción entre

comunidades, mencionando el peligro en las que éstas se encuentran respecto al CCG (Walther *et al.*, 2012). Asimismo, se tiene evidencia de los diferentes impactos que afectan ya fuertemente a sectores como la agricultura y la pesca, especialmente en poblaciones ya pobres y vulnerables. Tales efectos, como reducción del rendimiento de los cultivos, mayor calor para personas, animales, plantas, estrés hídrico y aumento en el precio de los alimentos, se harán cada vez más presentes. En esencia, las personas que dependen directamente de la agricultura y ganadería alterarán sus actividades, así como su capacidad para gestionar recursos naturales. Por lo que, la seguridad alimentaria se verá amenazada debido a la disminución en la adaptación y resistencia de especies animales y plantas (FAO, 2013).

El IPCC publicó su último informe (2018) sobre los impactos del calentamiento global y lo que se necesitaría para limitar el calentamiento a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales, un objetivo que se ve cada vez más improbable, aunque muchos de los datos del informe no son nuevos. El informe señala que se necesitaría un esfuerzo global masivo, mucho más agresivo que cualquiera de los que hemos visto hasta la fecha, para mantener el calentamiento en línea con 1,5 °C, en parte porque el planeta ya está en camino de subir hasta los 3 °C

de media de la temperatura para 2100. E incluso si solo subiera hasta el objetivo de los 1,5 °C, el planeta todavía se enfrentaría a cambios masivos y devastadores.

En el informe se comparan las consecuencias de subir 1,5 °C y 2 °C. Por ejemplo, para 2100, el aumento del nivel del mar global sería 10 cm más bajo con un calentamiento global de 1,5 °C en comparación con 2 °C. La probabilidad de un Océano Ártico libre de hielo marino en verano sería una vez por siglo con un calentamiento global de 1,5 °C, comparado con al menos una vez por década con 2 °C. Los arrecifes de coral disminuirían en un 70-90% con un calentamiento global de 1,5 °C, mientras que prácticamente todos (> 99 %) se perderían con 2 °C. Se espera que en 2030 el límite de los 1,5 °C ya se haya alcanzado y que continúe avanzando hacia temperaturas peligrosas. Las olas de calor serán más frecuentes e intensas. Habrá más tormentas y serán más dañinas. Subirá el nivel de los océanos por encima de las previsiones. Estos eventos pueden tener un efecto multiplicador que le costará al planeta mucho más que perder vidas humanas y ocasionar graves daños materiales. Las inundaciones costeras pueden crear una crisis de refugiados que, a su vez, puede provocar conflictos armados, por ejemplo. Lo anterior no son solamente riesgos que enfrentamos todos los seres

humanos, sino también todos los seres vivos que habitamos en la Tierra.

En términos de la dimensión que tiene ya la problemática asociada al CCG, poco se está haciendo para reducir las emisiones de GEI y con ello, las causas asociadas a ésta son cada vez mayores. En muchos sitios, existe una mayor variabilidad de las precipitaciones, frecuencia de eventos meteorológicos extremos (sequías e inundaciones), aumento en el nivel medio del mar, acidificación del océano, seguido de modificaciones en la temperatura durante lapsos muy cortos. Lo anterior provoca que en diferentes poblaciones cada vez más densas, las personas se pueden ver obligadas al abandono de sus hogares; la migración es y será en el presente siglo, una vía en la búsqueda de mejores condiciones de vida (IPCC, 2019).

La vulnerabilidad ante el CCG que padecen ya un gran número de seres humanos, no depende directamente del clima, sino de los factores socioeconómicos y culturales ante la desigualdad planetaria, como son: la pobreza extrema, la exclusión social, la infraestructura, los servicios sociales inadecuados, la carencia de derechos, la inaccesibilidad a recursos naturales relevantes (suelo y agua) podrían agravar la vulnerabilidad de ciertos grupos susceptibles al CCG (Heudtlass, 2016). Más aún, la desigualdad de género produce que un



amplio número de mujeres alrededor del planeta, padezcan y mueran debido a los fenómenos meteorológicos extremos que son cada día más frecuentes. Por ello, integrar la perspectiva de género en la problemática del CCG es fundamental. La principal razón es el alto porcentaje de mujeres que viven en condiciones de extrema pobreza, desigualdad de oportunidades, violencia, segregación, entre otros factores más. Cuando las mujeres son pobres, sus derechos no están protegidos. Se enfrentan a obstáculos que pueden resultar extraordinariamente difíciles de superar. Esta situación da como resultado privaciones en sus propias vidas y pérdidas para la sociedad en general y para la economía, puesto que es bien sabido que la productividad de las mujeres es uno de los principales motores del dinamismo económico (OMS, 2014; citado en Heudtlass, 2016). Unos 15 millones de niñas nunca aprenderán a leer y a escribir y 300,000 mujeres mueren anualmente por causas relacionadas al embarazo. En América Latina, hay 124 mujeres que viven en extrema pobreza por cada 100 hombres (ONU, 2018). Asimismo, el 70% de las personas que viven en pobreza extrema en el mundo, son mujeres.

Además, aún existen claras diferencias de éstas con respecto a los hombres en el acceso a servicios y derechos básicos como la educación, la sanidad o la

planificación familiar. El artículo ‘La pobreza tiene rostro de mujer’ recoge las principales causas que han provocado y mantienen esta discriminación, entre las que se encuentran la mayor dificultad para acceder a los recursos o los puestos de toma de decisiones, por ejemplo, así como su mayor vulnerabilidad ante abusos sexuales o recorte de libertades individuales (ONU-CEPAL, 2016).

### *1.1 Género, machismo, vulnerabilidad y resiliencia*

De acuerdo con Oswald (2013), la seguridad humana y de género ambiental, posee dos variantes de vulnerabilidad: a) La vulnerabilidad ambiental, la cual está relacionada con las condiciones físicas peligrosas (lechos de ríos, deslizamiento de taludes, por ejemplo), cambio climático, pérdida de servicios ecosistémicos, deterioro ambiental, falta y contaminación del agua y suelos erosionados. Estos fenómenos agravan desastres y conflictos por recursos escasos e inducen a la migración ambiental y, b) La vulnerabilidad social está relacionada con la fragilidad de comunidades, grupos sociales y familias que, por sus altos niveles de marginalidad, desempleo, hambre, discriminación, inseguridad, jóvenes sin trabajo y falta de entrenamiento, no resisten ante los desastres. Las vulnerabilidades se agravan por pobreza, carencia de educación y

marginalidad. Incluyen la falta de servicios básicos como agua, salud, educación y alimentos sanos. Muchas mujeres carecen de educación e ingresos propios, y fueron socializadas para cuidar a los demás, aunque sea a costo de su propia vida. Las condiciones de desigualdad agudizan las crisis económicas, la urbanización caótica, la violencia, los accidentes y la inseguridad de género. La migración forzada por desastres (Oswald *et al.*, 2014) puede generar perspectivas de vidas truncadas y mayor pobreza, lo que aumenta los riesgos de ignorancia, violencia, abandono y soledad.

Ambas vulnerabilidades se agudizan por la presión demográfica, el consumismo, las emisiones de GEI y la producción de basura, lo que reduce la seguridad humana, la de género y la ambiental. Esta doble vulnerabilidad debilita además la resiliencia y limita el acceso a recursos naturales y bienestar. Los gobiernos autoritarios no reducen los riesgos para poblaciones expuestas, lo cual genera desconfianza hacia las autoridades. Además, existe un sesgo masculino en los cargos de importancia y hay pocas presidencias municipales y gobernadoras, representadas por mujeres. Estas discriminaciones limitan la agenda de protección a la población y restringen la participación ciudadana. No hay capacitación para las comunidades, barrios y lugares de alto riesgo, y menos aún entrenamientos

específicos para mujeres, para que pudieran preventivamente participar en su comunidad o colaborar en la negociación de los conflictos sociales y ambientales. La marginalización se incrementa también a raíz de la ruptura de las redes sociales tradicionales y, muchas veces, se agrava por la represión, cuando comunidades afectadas se organizan para luchar por su supervivencia (Oswald *et al.*, 2014).

El concepto de “género” determina lo que se espera, se permite y se valora en una mujer o en un hombre en un contexto dado. El género, al igual que cualquier otra construcción social subyacente, podría abordarse de otra manera en diferentes fases de la respuesta humanitaria. Aunque el género no es suficiente para revelar y comprender las relaciones de poder y las desigualdades entre los sexos (Eklund y Tellier, 2012).

Desde la perspectiva de género –como un constructo social-, Oswald (2016) menciona que fue De Beauvoir (1949) quien, como pionera, generó una revolución en el pensamiento de la relación entre hombres y mujeres. La discusión se ubicó en el contexto de la cultura y se formuló un replanteamiento crítico en la visión de la construcción social del género de hombres y de mujeres. Asimismo, el feminismo generó un movimiento político que denunció la discriminación

y la condición subordinada de las mujeres en todo el mundo; se cuestionaron las estructuras patriarcales institucionalizadas, incluidos los grupos del poder hegemónico. Se mostró que la división del trabajo estaba basada en actividades específicas vinculadas con la construcción social de género. El estudio crítico de la maternidad descubrió un proceso de naturalización de la identidad femenina, mientras que la maternidad como institución y como experiencia tiene implicaciones múltiples, y efectivamente es muy importante para las mujeres, la sociedad y la relación entre los géneros. Hay un punto central en la maternidad, en ese ser para otros que se conecta con la desigualdad y la vulnerabilidad femenina.

Cabello Martínez *et al.* (2017) menciona que la categorización de “género” existe, al menos en las relaciones entre las personas y las sociedades. Dicho concepto hace referencia a las relaciones de poder entre hombres y mujeres, causa de grandes desigualdades, sean en el ámbito individual o colectivo y consecuencia del aprendizaje, la cultura y la sociedad. Esta idea se enmarca en las reflexiones de Lagarde (2012) que entiende el género como aquello que está presente en el mundo, en las sociedades, en los sujetos, en sus relaciones y en la política. Son importantes las aportaciones que la antropóloga americana Rubin (1996) hace, al

referirse al «sistema sexo-género» considerando el género como «una divisoria impuesta socialmente a partir de relaciones de poder. Es una divisoria que asigna espacios, tareas, deseos, derechos, obligaciones y prestigio. Es decir, además de como categoría analítica, se considera un sistema de organización social».

Por otra parte, Vieitez *et al.* en 2012 (citado por Cabello-Martínez *et al.*, 2017), ahondando en los estudios de género y desarrollo, apoyan y analizan la peculiar relación entre género, cultura y sociedad. La cultura es entendida como el conjunto de diferentes formas de vida, significados y valores, siendo heterogénea, diversa y en continuo movimiento. La categoría de género, en este marco, se vincula con el orden cultural y con una determinada organización social en la que las mujeres están en una posición desigual con respecto a los hombres. Es decir, los valores culturales van a influir en la construcción de las percepciones de desarrollo y de género y van a condicionar la respuesta local y global a estos aspectos.

Tripp en 2008 (citado por Cabello-Martínez *et al.*, 2017) por su parte, hace una dura crítica hacia aquellas sociedades que defienden prácticas culturales que perjudican a las mujeres en nombre de la preservación de su identidad religiosa, étnica o cultural, muchas veces buscando proteger ciertos

intereses políticos, económicos, lo que ha llevado a la «culturalización» de los debates en torno al género y los derechos de las mujeres. Vieitez en 2013 y 2014 (citado por Cabello Martínez *et al.*, 2017), reivindica que las prácticas culturales dañinas para las mujeres deben ser tratadas como un problema político más amplio, no limitando la intervención feminista a las reformas legales en exclusiva, sino dando valor, por ejemplo, a los trabajos sobre educación.

En México, fue Basaglia en 1982 (citado por Oswald, 2016) quien primero separó la condición de ser-para-otros en la mujer como naturaleza, la mujer como cuerpo-para-otros y la mujer madre-sin-madre como ejes de análisis. Después, Lagarde en 1990 (citado por Oswald, 2016) analizó los cautiverios de las mujeres mexicanas y encontró las categorías de madre-esposas, monjas, prostitutas, presas y locas. Estas asignaciones milenarias de roles y la auto-identificación aumentan la doble vulnerabilidad y limitan la resiliencia.

En el sistema patriarcal que impera en nuestro planeta, el origen del machismo y de las subordinaciones de las mujeres tal como las conocemos actualmente, se han estancado en el proceso civilizatorio; en otras palabras, se entiende en esencia como el derecho de ejercicio a la fuerza física o su ejercicio real basado en la superioridad

del hombre en múltiples terrenos (social, cultural, político, entre otros) que implica la violencia doméstica entre otros factores (Perus, 2012).

Dentro de un sistema patriarcal establecido, el machismo, como construcción cultural, es un modo particular de concebir el rol masculino, modo que surge de la rigidez de la mayor parte de las sociedades del mundo contemporáneo, para establecer y agudizar las diferencias del género entre sus miembros. Es así como se generan expectativas del comportamiento en torno al varón, que incluyen valores y actitudes, conformando de este modo una concepción ideológica asentada en la superioridad del macho en relación con la hembra, superioridad que se ha pretendido fundamentar desde distintas perspectivas ideológicas a lo largo de la historia del pensamiento (Daros en 2014 citado por Álvarez-Cervantes, 2016). En resumen, el término “machismo” como una ideología patriarcal, defiende una supuesta superioridad del varón a costa de despreciar los valores y actitudes femeninas (Ide en 2004 citado por Álvarez-Cervantes, 2016).

### *1.2 Género y Desastres Naturales*

El término “desastres naturales” está mal definido, debido a que ha sido aceptado durante mucho tiempo que la actividad humana es la que ha creado



las condiciones para que la naturaleza presente las condiciones que conllevan a los eventos desastrosos, es decir, “no son naturales”, son inducidos y el paradigma naturalista sigue insistiendo que son procesos naturales. También, se ha incrementado el entendimiento de que los “peligros” son naturales, pero para que un “peligro natural” se convierta en un “desastre natural” tiene que afectar personas vulnerables, que paradójicamente son las que hacen que exista tanto el “desastres”, como el “peligro”. En este contexto, Cannon (1994) argumenta: “No hay oportunidades generalizadas y riesgos en la naturaleza, sino que hay conjuntos de desigualdades en el acceso a las oportunidades y las exposiciones a riesgos desiguales que son una consecuencia del sistema socio-económico”.

Existe un acuerdo en común acerca del término de “desastre”, definido por Kent en 1987 (citado por Yeo y Blong, 2010): “Un desastre ocurre cuando un agente de desastre expone la vulnerabilidad de un grupo o grupos de tal manera que sus vidas están en peligro. Daño suficiente se ha hecho con los derechos económicos y las estructuras sociales que socavan inevitablemente su capacidad de supervivencia”. De igual forma, el concepto dado por Wisner en 1983 (citado por Yeo and Blong, 2010, p.670) define el “desastre” como “La interfaz

entre un acontecimiento físico extremo y una población humana vulnerable”.

Por otro lado, el concepto de vulnerabilidad se ha hecho más común en referencia hacia los peligros producidos por eventos extremos meteorológicos. Tomando como referencia la definición de vulnerabilidad de Wisner en 1996 (citado por Álvarez-Cervantes, 2016) como: “Las características de una persona o grupo y su situación que influye en su capacidad para prever, hacer frente, resistir y recuperarse del impacto de un desastre natural”. No obstante, la sociedad ha creado estas condiciones en que las personas enfrenten los peligros naturales de manera distinta en sus diferentes estratos sociales (Balikie, *et al* en 1996 citado por Álvarez - Cervantes, 2016); es decir, los desastres naturales no afectan a todas las personas por igual.

Debido al rápido desarrollo del concepto de vulnerabilidad, éste debe incluir el reconocimiento de que la vulnerabilidad debe ser vista como una condición que es muy dinámica, que varía en gran medida con el periodo de tiempo, lugar, tipo de crisis y el tipo de respuesta; una respuesta eficaz debe estar “centrada en las personas”, un ejemplo de ello: la situación social, económica y la interrelación de los individuos y las comunidades.

En el presente, es importante definir un concepto más en el tema de la vulnerabilidad ante el CCG: la resiliencia. Arlikatti *et al.* (2010), define ésta como la capacidad que desarrolla un sistema social, sus individuos y los sistemas biofísicos de los que dependen, para resistir o absorber los impactos (daños, muerte y pérdidas) que representan los riesgos naturales, así como la capacidad de recuperación que éstos a nivel sistema social o individuo, puedan desarrollar ante dichos impactos, y de esta manera poder reducir las vulnerabilidades futuras a través de estrategias de adaptación.

En términos de género, el más reciente informe de la ONU-mujeres, analiza los avances en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, y hace especial énfasis en alertar sobre la persistente discriminación de las mujeres y niñas en todo el mundo; una razón sumamente importante ante la vulnerabilidad. Gran parte de esta desigualdad se explica debido a la carga desproporcionada del trabajo doméstico no remunerado que enfrentan las mujeres, especialmente durante sus años reproductivos. Las desigualdades con base al género aún existen en todos los países, en todos los grupos sociales y son relevantes en todas partes. “Hemos hecho un análisis mirando a todos y cada uno de los Objetivos y en todos hemos encontrado que las mujeres están en peor lugar que los hombres”, dice Sara Duarte

Valero, experta en estadística de ONU Mujeres que participó en la realización del informe (ONU, 2018). El reporte resalta cómo todas las dimensiones del bienestar y la marginación están profundamente entrelazadas: una niña que nace en un hogar pobre y es forzada a casarse a una edad temprana, por ejemplo, tiene más probabilidades de abandonar la escuela, dar a luz demasiado joven, padecer complicaciones durante el parto y sufrir violencia doméstica, que una niña de un hogar de mayores ingresos.

De acuerdo con el informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018), las mujeres representan el 70% de los 1.3 mil millones de personas que viven en situación de pobreza extrema; porcentaje similar al de las muertes en mujeres ante fenómenos extremos meteorológicos. Las mujeres están siendo más afectadas que los hombres ante el CCG, ya que, por lo general, son responsables de asegurar la supervivencia de las familias al proveerlas de recursos tales como el agua, alimentos y combustibles, los cuales son cada vez más escasos; las mujeres, son las que menos acceso tienen a la información sobre lo que está sucediendo y son ellas las que en una gran mayoría de casos, deben dar respuesta. Un ejemplo de ello es que, en casos extremos de riesgo, son ellas las que protegen a la

familia que está en casa, a los animales y hasta a los padres que habitan con la familia.

El objetivo de este estudio ha sido identificar y analizar las principales causas socio-culturales-económicas que hacen que las mujeres sean más vulnerables ante el CCG, con base en los fenómenos meteorológicos extremos. Asimismo, proponer estrategias de adaptación para disminuir la vulnerabilidad de género.

La investigación está orientada hacia una reflexión que nos permita conocer la actual situación que se vive en una realidad dispar, con desigualdades de género, y cómo ésta debe cambiar en términos de alcanzar la equidad para la conformación de una sociedad más justa e igualitaria. Dentro de los principales objetivos de esta investigación aparece en primer plano comprender las aportaciones que existen desde la perspectiva de género, así como plantear el empoderamiento en clave feminista como una estrategia educativa y de mejora de la calidad de vida de las personas.

## **2. Materiales y Método**

El presente estudio es producto de una investigación documental en la cual se considera, que el CCG no es neutral ni es “natural”; es provocado. Para ello, se

llevó a cabo una revisión documental en bases de datos especializados, así como notas periodísticas, reportes técnicos institucionales, documentos de trabajo de instituciones académicas, revistas científicas indizadas; bases de datos nacionales e internacionales.

Para poder determinar las principales causas socioculturales que afectan primordialmente a las mujeres en eventos catastróficos relacionados con el CCG, se realizó una búsqueda de información en las distintas plataformas para la búsqueda de artículos, libros, reportes, manuales, notas periodísticas; bases de datos que brindaran una mayor obtención de la información. Para su búsqueda, se utilizaron palabras clave, tales como: “climate change”, “gender”, “global warming”, “natural disaster”, “natural disaster and gender”, “natural hazards and gender” “vulnerability”, “adaptación y cambio climático” “Inequidad de género”, “empoderamiento femenino” y “vulnerabilidad”; en diferentes posibles combinaciones.

Para determinar en qué tipos de desastres naturales había más mortalidad de las mujeres se revisaron artículos reportados tras catástrofes naturales, reportes emitidos por la ONU, estadísticas y notas periodísticas. Asimismo, para la obtención de los entornos en los que las mujeres se ven afectadas se realizó una revisión de literatura de los

campos que son vulnerables en el CCG (social, económico y biológico) y la búsqueda incluyó casos de estudio enfocados a soluciones viables de prevención en la mortalidad y vulnerabilidad de la mujer durante fenómenos meteorológicos relacionados con el CCG. También, se revisaron guías de adaptación al CCG, trabajos realizados por organizaciones no gubernamentales (ONG), medidas de mitigación emitidas por la ONU y agencias internacionales de ayuda, así como artículos relacionados.

Los resultados se elaboraron con ayuda de la base de datos de EM-DAT (*The Emergency Disaster Data Base*). El Centro colaborador para la Investigación sobre Epidemiología de los Desastres (CRED) ha mantenido una base de datos de eventos de emergencia llamado EM-DAT, que fue creado desde 1988, con el apoyo inicial de la OMS (Organización Mundial de la Salud) y el Gobierno Belga. La base EM-DAT tiene por objetivo principal de servir a los propósitos de la acción humanitaria a nivel nacional e internacional. Es decir, es una iniciativa destinada a racionalizar la presentación de eventos catastróficos, así como proporcionar una base objetiva para la evaluación de la vulnerabilidad y el establecimiento de prioridades. Por ejemplo, permite decidir si las inundaciones en un país determinado son más significativas en términos de

su impacto humano que los terremotos o si un país es más vulnerable que otro. EM-DAT contiene datos básicos esenciales sobre la ocurrencia y los efectos de más de 16,000 desastres masivos en el mundo desde 1900 hasta la actualidad. La base de datos está compilada de diversas fuentes, incluyendo organismos de la ONU, organizaciones no gubernamentales, compañías de seguros, institutos de investigación y agencias de prensa.

Para el análisis y procesamiento de resultados, se utilizaron filtros que brinda la base de datos para obtener los datos específicos que se presentan en este estudio (periodo de tiempo, tipos de desastres naturales, daños económicos, personas afectadas, número de muerte y número de eventos). La plataforma consultada es *The OFDA/CRED International Disaster Database* (EM-DAT, 2019).

### **3. Resultados y Discusiones**

Los resultados que se exponen a continuación están separados con base en los indicadores principales que producen una vulnerabilidad de género, siendo algunos de éstos, el tipo y ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, cuáles son los eventos que más afectan a las mujeres, los aspectos socioculturales y económicos en el que se



desarrollan las mujeres y finalmente, cuáles deberían ser las estrategias de mitigación y adaptación ante la vulnerabilidad que se presenta por el CCG. Lo anterior con base en el objetivo general de estudio y los específicos, respectivamente.

### *3.1 Los aspectos y entornos socio-culturales que aumentan el riesgo de muerte en la mujer, en los desastres naturales*

Con base en la revisión de literatura se obtuvo información acerca de las incomparables formas en las cuales, la desigualdad de género experimenta de manera distinta los desastres naturales en comparación con el hombre ante el CCG. En primera instancia, las mujeres suelen tener mucho menor acceso a la información sobre riesgos climáticos, debido a que un gran porcentaje suele permanecer en casa cuidando niños, ancianos y enfermos y los medios de comunicación informan y difunden muy poco respecto a esto.

Por otro lado, existen eventos registrados con un mayor índice de muerte en mujeres (Martins, 2018). Un ejemplo de ello, el tsunami ocurrido en la India en las islas de Andamán y Nicobar en 2004, el cual dio como resultado, un mayor número de mujeres muertas debido a las desigualdades de género que se encontraron en las áreas más afectadas. Estas discrepancias han sido explicadas por restricciones

culturales del comportamiento de la mujer en esta zona. Las mujeres no son incluidas en el aprendizaje de ciertas habilidades como son nadar o trepar árboles, y mucho menos reciben cursos sobre cómo y qué hacer ante eventos como éste. Las mujeres anteponen la seguridad de sus hijos y los bienes antes de su propia supervivencia (OXFAM International, 2014). Desde el informe de OXFAM International (2014) sobre el tsunami en Asia, son escasos los estudios enfocados específicamente en el impacto de desastres climáticos en mujeres. "La cifra del 80% (citada en la conferencia en Londres) es una extrapolación de casos bien documentados como el tsunami en Asia", señaló a BBC Mundo Denis McClean, vocero de la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos en Desastres, UNISDR por sus siglas en inglés.

Con base en investigaciones de la Universidad de Illinois y la Universidad Estatal de Arizona, se observó que las personas no toman en serio un huracán si éstos poseen nombre femenino y en consecuencia existe un mayor número de muertes en mujeres, que los huracanes con nombre masculino. Históricamente, las tormentas con nombre de mujer han matado a más número de personas porque no se les considera como algo arriesgado ni toman las mismas precauciones de acuerdo al estudio

publicado en las Actas de la Academia Nacional de Ciencias (Samenow, 2014).

Asimismo, las mujeres que pasaron por un desastre natural se encuentran más expuestas a la violencia sexual, debido a que existe un mayor índice de ansiedad y depresión, que en los hombres (Leyser-Whalen, 2011) y son ellas las que están más predispuestas a desordenes postraumáticos de estrés y depresión. Un ejemplo de ello es, que una mujer sobreviviente presentaba sentimientos de culpabilidad, debido a su ausencia en el hogar en el momento de la catástrofe, puesto que su marido no se encontraba trabajando por enfermedad, por lo que el esposo murió dentro del hogar; lugar que normalmente ocupan las mujeres incluyendo su deceso en el momento de las catástrofes (Najarian *et al.*, 2001).

También es importante mencionar que, de acuerdo con el modelo de conservación de los recursos, Hobfoll y Lily (1993), argumentan que los desastres amenazan o causan agotamiento de la condición física de las personas, la estabilidad económica, sensación de dominio, la autoestima, el bienestar y los recursos interpersonales. Por ello, los sobrevivientes a una catástrofe se esfuerzan por obtener, conservar y proteger el recurso que valoran. Este modelo podría ayudar a explicar realmente las amenazas que sienten las víctimas directas de una

catástrofe debido a la situación de estrés que presentan; éste conceptualizado como la pérdida neta de los recursos.

En términos de esperanza de vida, las mujeres presentan una mayor que el hombre, sin embargo, la mayor parte de las mujeres viven en un estado precario, dependiente del contexto social del lugar donde crecieron y de la calidad de vida. Cuando la sociedad diferencia los beneficios que merecen con base en su edad y sexo, las mujeres ancianas experimentan mayor opresión y/o devaluación o exclusión, por la pérdida de estatus, viudez, soltería, entre otras más. Estas “costumbres”, son principalmente dependientes y variables las reglas culturales de diferentes países (Aoláin, 2011).

Por otro lado, y debido a que los desastres naturales ponen aún mayor presión sobre las capacidades socioeconómicas de las mujeres, esto logra que las redes sociales se desintegren, y la composición y estructura de los hogares hace que el estatus ya marginal de las mujeres en las familias y comunidades, se desestabilice aún más (Aoláin, 2011). En otras palabras, hay una correspondiente necesidad de integrar desafíos que enfrentan las mujeres dependiendo de su edad, estado marital, social, religioso y étnico. De hecho, se ha observado cómo la inequidad social afecta la vulnerabilidad en los desastres naturales y su impacto en la capacidad

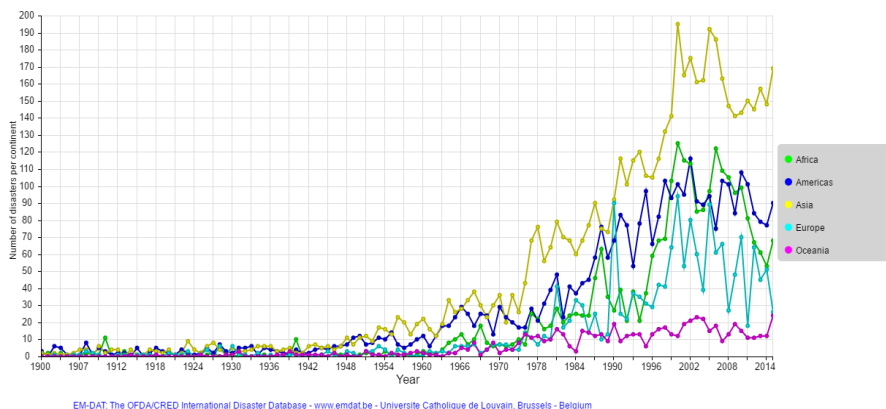
de hacer frente y analizar el impacto diferencial de los fenómenos meteorológicos. Éstos han sido analizados mediante una cuantificación en el número de muertes posterior a un desastre, en función de la amenaza y exposición, donde las más bajas indican mayor vulnerabilidad (Neher y Miola, 2015). Los resultados establecen que los países con mayor desigualdad en cuestión de género, la distribución desigual de los ingresos, la baja tasa de matriculación de mujeres, participación femenina en la fuerza laboral, están íntimamente relacionados con las fatalidades que se presentan en las catástrofes naturales. Lo anterior es muy *ad hoc* a la situación que viven las mujeres en México, por ejemplo.

La variación en la morbilidad de un país a otro difiere en cuanto a si es un país desarrollado o un país en desarrollo; lo anterior, aunque no exonera las secuelas ni de las pérdidas de vida, hogar, entre otras, ello sí muestra cómo se abordan de manera distintas las catástrofes. Un ejemplo de ello, el huracán Hugo (1989) en los Estados Unidos de América y Puerto Rico, durante el cual 8 de 44 muertes registradas se debieron a ahogamiento durante la tormenta; el resto de las muertes fueron relacionadas con incendios en casas donde se utilizaron velas, personas victimadas por casas móviles, árboles y madera caída (Philen, 1992).

Más aún, según con los datos del Centro para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés) durante el periodo de 1970-2004 en los Estados Unidos de Norte América hubo más muertes debido al clima extremo (frío o calor), que rayos, tormentas e inundaciones. En cada uno de estos eventos naturales, también se determinaron un número más alto de mortalidad, en mujeres. Además, determinaron los grupos de personas que estaban en mayor riesgo o vulnerabilidad que incluyen: pobres, ancianos, discapacitados y personas con conocimientos limitados (Thacker *et al.*, 2008).

### *3.2 Los eventos de origen meteorológico, relacionados con el cambio climático, que conducen a las mujeres a que presenten una mayor mortalidad*

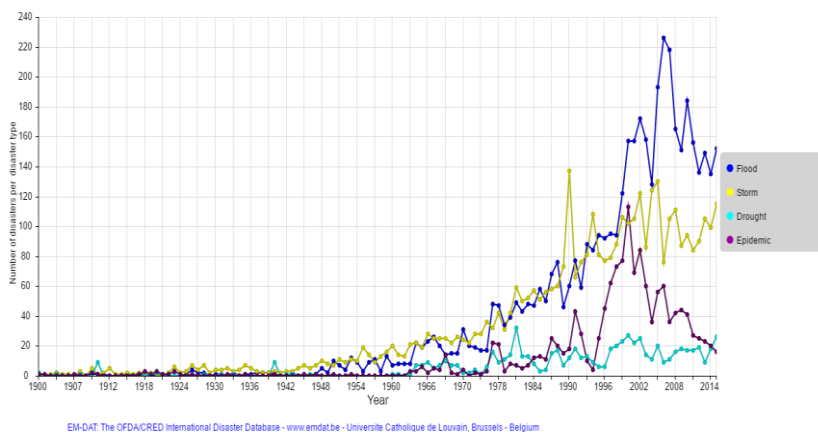
El creciente aumento de los desastres naturales relacionados con el CCG va en ascenso. De acuerdo con los datos obtenidos de EM-DAT, podemos observar claramente un incremento indudable desde el año 1900 hasta el 2014 en todos los continentes. En primer lugar, se observa Asia seguido por África y América con aumentos significativos por encima de 190 eventos para Asia, 120 para África y 110 para América en los últimos años (Figura 1).



Fuente:EM-DAT (2019)  
 OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium)

Figura 1. Número de desastres naturales por continente (1900-2014)

Con relación al aumento de eventos catastróficos naturales, podemos mencionar que se espera un incremento en la afectación de grupos vulnerables en las regiones principales (Asia, África y América), dentro de los cuales se han encontrado datos de un número elevado de mujeres afectadas en estas regiones en los distintos desastres naturales en comparación del hombre (*v.gr.*, Bangladesh, Indonesia) (Baden *et al.*, 1994; Suva, 2014). A su vez, se encontró un aumento de ciertos tipos de desastre en el periodo de 1900-2014, las inundaciones con el mayor número de eventos en los últimos 10 años, seguido de tormentas, epidemias y sequías (Figura 2) (EM-DAT, 2019).



Fuente: EM-DAT (2019)  
 OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium)

Figura 2. Desastres naturales más frecuentes en el Mundo (1900-2014)

Las inundaciones representan el primero tipo de desastre natural con mayor número de eventos, por lo que las agencias internacionales han determinado el daño, siendo éste identificado no únicamente por el número de muertes y personas afectadas. También, uno de los indicadores importantes para los formuladores de estrategias para mitigar daños es el económico, es decir, cuánto le cuesta al país donde acontece el desastre natural y si éste requiere de ayuda internacional. En la Tabla 1, se observan las 10 inundaciones más costosas durante el periodo 2010-2016 (EM-DAT, 2019).



Tabla 1. Costo de daños producidos por las 10 inundaciones más significativas en el periodo 2010-2016

<b>No. desastre</b>	<b>PAIS</b>	<b>Tipo</b>	<b>fecha</b>	<b>Total daño ('000 US\$)</b>
<b>2011-0326</b>	Tailandia	Inundación	05/08/2011	40000000
<b>2010-0239</b>	China	Inundación	29/05/2010	18000000
<b>2014-0343</b>	India	Inundación	00-09-2014	16000000
<b>2013-0205</b>	Alemania	Inundación	28/05/2013	12900000
<b>2002-0467</b>	Alemania	Inundación	11/08/2002	11600000
<b>2008-0627</b>	Estados Unidos de América	Inundación	09/06/2008	10000000
<b>2010-0341</b>	Pakistán	Inundación	28/07/2010	9500000
<b>2012-0292</b>	China	Inundación	21/07/2012	8000000
<b>2000-0671</b>	Italia	Inundación	14/10/2000	8000000
<b>2003-0315</b>	China	Inundación	23/06/2003	7890000

Fuente : EM-DAT (2019)

OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium)

En el caso particular de México, han ocurrido distintos tipos de desastre natural. Entre 1900-2016 se han presentado 246 desastres naturales, como sequías, temperatura extrema, inundación, deslizamiento de tierra, tormentas, en otros. En este periodo, se han determinado 23,216 personas muertas y cerca de 19,000,000 millones de personas afectadas, hasta el año 2015. El costo total del daño ha sido alrededor de US\$40, 000,000 billones de dólares (EM-DAT, 2019). En la Tabla 2 se pueden observar los 10 desastres naturales que más vidas han cobrado, más costos económicos han generado y que más han afectado a la población en general (perdida de hogar, ganado, cultivos, etc.). De los

cuales, los ciclones tropicales encabezan con 83 eventos, seguido de 72 inundaciones, 17 eventos de temperatura extrema, 7 sequías y 5 incendios forestales. Todos los anteriores, son catástrofes relacionadas con el CCG.

En 2009, se encontró que los cambios en el clima y el agotamiento de los recursos hídricos asociados en Sonora (México), ponen en peligro los medios de vida de las mujeres cada vez más, así como sus relaciones sociales. Las mujeres, quienes dominan en los campos agrícolas de las frutas (ciruelas, higos, aceitunas, chabacano) y hortalizas enlatadas caseras, cada vez son más escasas y se ven afectadas no solamente en su seguridad alimentaria, sino que también utilizan estos productos como regalos para fortalecer sus lazos sociales, porque con ello pueden lograr recibir ayuda o contar con la ayuda de miembros de la familia y externos (Buechler, 2009). Otro caso, es el de Monterrey (México) durante 1995, en el cual se observó que una sequía prolongada causó una gran tensión económica a las mujeres solteras y viudas con hijos, quienes estuvieron en condiciones muy limitadas de ayuda. Bajo estas circunstancias, algunas mujeres se dedicaron a la venta de ganado menor, que en última instancia redujo su capital financiero, sin embargo, fue notable, que en aquellas mujeres que heredaron terrenos, la situación no

sucedió igual; los maridos obtuvieron permisos para utilizar las tierras (Biskup y Boellstorff, 1995). Por lo anterior, se puede observar dos tipos de situaciones donde las normas culturales pueden ayudar algunas mujeres (las que heredaron), aumentando así sus ganancias derivadas de la ganadería en desventaja de las madres solteras o viudas. Asimismo, en cuestiones de la educación, las mujeres tienen menos acceso a la información, por ende, en situaciones de manejo de los riesgos climáticos en la producción agrícola, se requiere de información, destrezas, tecnologías, pronósticos estacionales, análisis de riesgos, prácticas agrícolas de ahorro de agua (Denlay y Shrader, 2000; ONU, 2009).

Tabla 2. Los 10 desastres naturales más importantes en México (1900-2016)

Desastre natural	Tipo de Desastre	Numero de eventos	Total Muertos	Total afectados	Daño Total ('000 US\$)
Sequía	Sequia	7	0	2565000	1610000
Sismo	Movimiento de suelo	32	10686	2658353	6161000
Epidemia	Enfermad viral	2	16	48212	0
Epidemia	Infección bacteria	1	52	5000	0
Temperatura extrema	Onda de calor	3	470	0	0
Temperatura extrema	Onda fría	14	718	136000	582600
Inundación	Riada	12	245	364227	0
Inundación	Inundación costera	4	912	746060	1054000
Inundación	--	28	3168	680595	586400
Inundación	Inundación riberena	28	478	3358696	3159000
Deslizamiento	Lahar	12	332	320	0
Tormenta	Tormenta convectiva	5	175	261591	2500
Tormenta	Ciclón tropical	83	4734	8010125	31088510
Actividad volcánica	Ceniza	10	1120	161908	117000
Incendios	Fuego forestal	3	50	0	91200
Incendios	Fuego de tierra (arbustos)	2	60	0	0

Fuente: EM-DAT (2019)

OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium)

Los eventos meteorológicos extremos producidos por el CCG ponen y pondrán en peligro los requerimientos para tener una vida estable, segura y conservar los recursos naturales. Las amenazas afectan de manera particular a los países más pobres y vulnerables, donde los gobiernos a menudo son los menos preparados para responder adecuadamente ante una situación de catástrofe. Actualmente, el cuarenta por ciento de los conflictos internacionales se han relacionado con la lucha por

los recursos naturales. Estas tensiones relacionadas con el clima, como la escasez de agua e inundaciones, han contribuido a conflictos en países como Sudán y Somalia (OXFAM, 2009). Lo que nos deja una posible visión futurista de los próximos acontecimientos de violencia por la afectación directa del CCG sobre los recursos naturales; la situación actual en Europa es un claro reflejo de lo que está sucediendo a este respecto.

El Panel de Generales y Almirantes Retirados (USA) encontró en su estudio llevado a cabo, que el CCG podría aumentar el riesgo de conflictos violentos en 46 países, los más volátiles (OXFAM, 2009). Mientras aumenta la sequía y la disminución de la producción de alimentos en América latina y África, muchas personas se verán obligados a migrar de la zona rural a la urbana. Esta presión dará lugar a una masa de personas queriendo cruzar las fronteras, principalmente de América central y del sur, África y Asia, hacia EUA y Europa. Por lo que, los gobiernos, estatales, locales, militares, serán llamados para responder ante este tipo de situaciones, lo cual es y será otra causa, de vulnerabilidad para las mujeres.

En la actualidad, cuando existen emergencias humanitarias en los desastres naturales (refugiados por catástrofes), se han caracterizado las fallas de los sistemas de salud, encontrándose aumento en la

mortalidad por enfermedades infecciosas y superando el número de muerte por violencia de los refugiados. Las poblaciones afectadas son heterogéneas y principalmente, refugiados. También, las personas desplazadas internamente y residentes difieren sustancialmente en su acceso a los servicios de salud. En estas situaciones, las mujeres refugiadas sufren atentados de violencia y violación (Denlay y Shrader, 2000).

Respecto a las cuestiones de poder, el hombre tiene mayor poder de intervención y toma de decisiones en la política de las comunidades; tienen más probabilidades de ser más influyentes en el fomento de políticas y programas de gobierno local, en los cuales, los derechos de la mujer y sus prioridades no son apoyados (Denlay y Shrader, 2000). La distribución desigual de los derechos, recursos y poder, limita mucho a las mujeres en su capacidad de tomar acción frente al CCG (Enarson y Morrow, 1998).

### *3.3 Medidas de mitigación y adaptación: solución para la vulnerabilidad*

Desde el 2009, la Guía de Recursos de Género para el Cambio Climático publicada por el PNUD, explica la estrecha interrelación entre el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo

del Milenio (ODM), en particular la erradicación de la pobreza, la salud infantil y materna, la erradicación de enfermedades como el VIH/SIDA, la malaria y otras, así como su estrecha vinculación con el medio ambiente y a su vez como los efectos del cambio climático tienen implicaciones diferenciadas entre hombres y mujeres. Por ejemplo, respecto a la erradicación de la pobreza extrema y el hambre, se señala como los principales esfuerzos de erradicación pueden verse afectados por el cambio climático e impedir, entre otros, la producción agrícola de subsistencia y con fines comerciales, con un impacto correspondiente en la seguridad alimentaria y en el acceso al agua potable. También se mencionan, las implicaciones que esta situación tiene particularmente en las mujeres: entre otras razones se señalan aquellas que se derivan de la pérdida de especies de plantas y animales domésticos que se emplean en la alimentación de las familias; la reducción o desaparición de especies marinas también empleadas como parte de la dieta o como una actividad productiva; y los efectos doblemente nocivos que tienen los desastres naturales en la población femenina (PNUD, 2008).

La actual agudización de la crisis ambiental se asienta en una realidad que antecede a los problemas del cambio climático y que, al ser invisible, no advertida y, por consiguiente, no observable suele

ser omitida en los análisis del problema, en el conocimiento y evaluación de sus impactos y en las propuestas de solución. Esa realidad se refiere a la cultura de género basada en las diferencias entre mujeres y hombres como fundamento de un orden social jerarquizado y desigual en el cual las mujeres se encuentran en una posición subordinada. Asimismo, Desde el inicio de las negociaciones internacionales sobre el cambio climático y al calor de las controversias que se suscitan en las Conferencias de Partes, los movimientos feministas y de mujeres, las integrantes de organizaciones no gubernamentales y las expertas en los temas ambientales y de género, han puesto de manifiesto que la perspectiva de género es un gran vacío en el tratamiento del problema del cambio climático y en las estrategias, políticas, mecanismos y fondos que se han acordado para enfrentarlo. Los planteamientos sostienen que si no se toman en cuenta las diferencias entre mujeres y hombres y las desigualdades de género que caracterizan a nuestra sociedad, las políticas para enfrentar el cambio climático mostrarán vacíos y deficiencias que tenderán a profundizar las desventajas de las mujeres (Mujer y Medio Ambiente, 2010).

Para realizar las afectaciones del CCG sobre el derecho de las mujeres efectivo y duradero, es necesario tener en claro los conceptos: adaptación



y mitigación. El primero, se refiere a ajustar sistemas naturales o humanos, en respuestas a cambios climáticos reales o esperados; el segundo sobre la mitigación, se refiere a actividades humanas que reducen las fuentes de GEI o incrementan los depósitos de captura de carbono como los bosques, los océanos y la tierra (Fondo Global *Greengrants*, 2015). El CCG plantea muchas nuevas amenazas y desafíos para la seguridad nacional, así como para la estabilidad internacional y la seguridad humana. En todo el mundo los pobres de las áreas urbanas y rurales ya están bajo presión y para algunos grupos como el de mujeres jefas de hogar en África, la adaptación al estrés inducido por el clima será muy difícil (Ipade, 2014).

Los megaproyectos concebidos por estados nacionales como soluciones al CCG, como son las plantaciones forestales de gran escala, bajo los Mecanismos de Desarrollo Limpio (CDM, por sus siglas en inglés), propuestas por el protocolo de Kyoto, y la construcción de represas y reservorios más grandes, han desplazado a miles de pobres y grupos vulnerables. Los efectos políticos y económicos han sido los principales motores para los actores estatales, sin considerar las afectaciones negativas sobre los grupos vulnerables y la biodiversidad (Wisner *et al.*, 2007). Recordemos que el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) fue

propuesto en El Protocolo de Kyoto, concebido para permitir y abordar en última instancia, los objetivos divergentes y prioridades, que existen entre el Norte y el Sur. Es un acuerdo bilateral, entre los países industrializados, que deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero bajo la Convención, y los países en desarrollo. Con base en el MDL, los países industrializados deben invertir en proyectos que aumenten económicamente la productividad y que puedan reducir los problemas en el medio local, de los países en desarrollo. Estos proyectos pueden y deben financiar apoyos que logren disminuir la vulnerabilidad de los más pobres, cuya mayoría son mujeres (Denton, 2002).

Lo anterior muestra un panorama en el que el CCG no impacta a todos por igual. Las mujeres son afectadas desproporcionadamente debido a que son quienes se encuentran más cercanas a los recursos naturales (leña, agua, agricultura y ganadería a pequeña escala); más aún, dependen de ellos. Además, debido a las desigualdades sociales, étnicas y culturales, las mujeres son privadas de la información sobre el CCG y su participación en los procesos de toma de decisiones sobre planes de mitigación y de adaptación, en los cuales su participación es muy limitada y sus representantes en los congresos, generalmente son hombres que

toman decisiones sin conocer sus realidades específicas (Wisner *et. al.*, 2007).

Es evidente que las mujeres están ausentes del proceso de toma de decisiones sobre cambio climático (Aguilar-Revelo, 2021). El objetivo es asegurar que la igualdad de género y la autonomía de todas las mujeres y las niñas, en su diversidad, sean priorizadas y abordadas de forma integral en el contexto de las acciones sobre cambio climático llevadas a cabo a nivel nacional y regional; y se asegure la plena participación de las mujeres como actoras climáticas, que desarrollan su capacidad de resiliencia y la de sus comunidades para alcanzar la Agenda 2030 y los objetivos del Acuerdo de París. El debate climático no ha tratado de abordar la marginación existente de las mujeres, ni su necesidad de integrarla en las políticas ambientales. Ni tampoco existen políticas de prevención, mitigación (adaptación) relativas a los riesgos que las mujeres padecen ante el calentamiento global, ni inclusive ante la magnitud de los fenómenos meteorológicos extremos, como lo mencionó Denton (2002). Es importante resaltar la falta de participación de las mujeres en la toma de decisiones a todos los niveles, y el hecho de que el debate climático hasta ahora ha hecho poco esfuerzo para agrupar los problemas en una forma en

que la gente común puede incluso entender, y mucho menos en participar.

Se han creado varios tipos de fondos para el financiamiento de las estrategias de mitigación y adaptación, cuyo funcionamiento es necesario conocer para explorar las posibilidades y conveniencia de integrar el enfoque de género. Algunos de ellos son: Fondo para los países menos desarrollados y fondo especial para el cambio climático. Estos fondos se destinan a proyectos y programas de adaptación en países que se consideran especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático. Los recursos financieros de este fondo provienen, principalmente, del impuesto (de 2%) sobre la venta de los certificados de reducción de emisiones y se tiene acceso a ellos a través del Global Environment Facility (GEF). El fondo para los países menos desarrollados se dirige a los países que han sido definidos como tales por la CMNUCC y tienen la función de apoyar en la formulación de Programas Nacionales de Adaptación (conocidos como NAPAs), con base en la identificación actividades prioritarias para las necesidades urgentes de adaptación que de no atenderse de manera inmediata pueden incrementar la vulnerabilidad de un país. Por su parte, el fondo especial para el cambio climático se dirige también a los países en desarrollo en general, entre los que se incluye a

México y se enfoca en las actividades de adaptación y la transferencia de tecnología, para lo cual se toman como base las comunicaciones nacionales, es decir los informes sobre los avances y necesidades de mitigación y adaptación del país que México se compromete a reportar en el marco de la CMNUCC (Mujer y Medio Ambiente, 2010).

Se han hecho críticas a las dificultades técnicas y metodológicas para tener acceso a estos fondos debido a los complejos requisitos para la formulación y realización de los proyectos que se financiarán y a lo limitado de los fondos, ya que las necesidades superan los montos destinados. Aparte de esto, es recomendable investigar los resultados de la aplicación de estos fondos en México y hacer una revisión de experiencias que se han propuesto integrar el enfoque de género, en qué proyecto, qué resultados se han obtenido y qué aprendizajes se pueden obtener. Para el caso de los 48 países menos desarrollados, el fondo especial de cambio climático toma como base los NAPAs y estos recursos serán manejados por entidades de gobierno, que serán responsables de su administración y asignación.

Es importante mencionar que el cambio climático es tratado como un evento científico, pero sus implicaciones tienen y tendrán, dimensiones humanas de largo alcance. Hasta ahora, se le ha dado un énfasis, resultando en debates polémicos y

dinámicas de poder. Así, naciones ricas continúan esquivando los problemas reales, mientras que los países más pequeños o menos poderosos aseguran que se quedan fuera del contexto y aceptan lo que sea necesario para mantener el Acuerdo de Kyoto juntos. Dentro de este debate de pura economía, tecnicismos, y “flexión muscular”, dejan fuera del debate la vulnerabilidad de género y sus implicaciones ante el cambio climático global (Denton, 2002).

Existe una fuerte correlación entre la inequidad de género y la tasa de sobrevivencia de la mujer en los desastres naturales como los tifones, sequías e inundaciones. La organización Mundial de la Salud (OMS) ha estimado que la mujer es 14 veces más probable que muera, que los hombres como resultado de los peligros naturales (Mac Gregor, 2010).

Existen estudios de casos específicos de países en desarrollo en los que se ha demostrado, como la desintegración económica y social causada por el desplazamiento (*v.gr. emigraciones*), provoca un empeoramiento del estatus de la mujer y su vulnerabilidad. Las mujeres constituyen el 70% de los pobres del mundo y son el 80% de los refugiados en el mundo, por lo que se consideran como la mayoría de las personas que serán desplazadas por el CCG (UNESCO, 2011); lo anterior generará más violencia contra la mujer, que sería todo lo contrario

a lo que esperan algunos gobiernos y las agencias de ayuda internacional.

En este sentido las agencias de ayuda exhiben las mayores tasas de mortalidad entre las personas desplazadas (refugiados) seguido de los residentes. Por ello, se requiere llevar a cabo más investigaciones al respecto, que aclaren con mayor precisión las tasas de mortalidad, las causas de ésta, el acceso de las mujeres a los servicios de salud, entre otras afectaciones. De igual forma, la pobreza y el bajo nivel social también contribuyen a que sea menos probable la integración de la mujer en la toma de decisiones y esto a su vez, las deja social y económicamente más marginadas, y las pone en una situación de mayor vulnerabilidad ante los efectos de CCG. De hecho, el IPCC acepta lo anterior mencionado, que las personas con menos recursos son las más vulnerables a los impactos negativos del CCG (Dankelman, 2002); dejando en claro que sus esfuerzos han sido nulos e ineficientes en auxiliar a estos grupos vulnerables y la poca relevancia que las agencias internacionales han demostrado y con mayor incidencia en los niveles estatales o locales.

La observación general de que las mujeres son más afectadas negativamente por el CCG ocurre también dependiendo de su estado civil, relación con el jefe del hogar o situación familiar. Las mujeres solteras, madres solteras, mujeres que no son

primeras esposas y otros miembros femeninos de la familia pueden tener un menor acceso a los recursos y asistencia durante las crisis del clima (Biskup y Boellstorff, 1995).

Existe un patrón en los cambios de las causas de muerte y la enfermedad, durante el tiempo. Utilizando ampliamente el concepto de “transición de salud” la Organización Mundial de la Salud (Aoláin, 2011) ha identificado tres cuestiones interrelacionadas y que se refuerzan mutuamente los elementos que afectan en la salud de la mujer: la estructura demográfica, patrones de la enfermedad y el factor de riesgo. En la primera etapa de la transición de la enfermedad las mujeres y niños presentan una alta tasa de mortalidad relacionada con deficiencias nutricionales, saneamiento, mala calidad del agua, el humo de combustibles sólidos (leña) utilizados para cocinar y calentar. También afecta la falta de atención durante la infancia, el embarazo, la maternidad, atención postnatal (Aoláin, 2011). Estos problemas son comunes en los países en desarrollo y se agudizan en situaciones de pobreza y eventos naturales catastróficos.

En países de bajo ingreso, cuya incidencia de crisis humanitaria es mayor, presentan una alta prevalencia de enfermedades de transmisión, cuidados maternos y perinatales; éstos representan el 38% de las muertes en las mujeres. La



combinación de factores biológicos y socioculturales indica que mientras el estado de salud de la población en conjunto se deteriora durante una crisis humanitaria (desastre natural) las mujeres y niños son mayoritariamente más vulnerables (Aoláin, 2011). La aceptación de la realidad a tal vulnerabilidad no ha llevado lo suficientemente lejos, debido a la constante propagación de la inevitabilidad e impotencia.

Es claro pues, que las mujeres están evidentemente ausentes del proceso de toma de decisiones sobre cambio climático. El debate climático no ha tratado de abordar la marginación existente de las mujeres, ni su necesidad de integrarse en las políticas ambientales. Ni tampoco se considera la magnitud del fenómeno en eventos extremos como es el caso de las inundaciones en Mozambique, en el cual se logró impresionar a los tomadores de decisiones sobre la importancia de colocar a las mujeres en la toma de decisiones ante la vulnerabilidad de las mismas (Denton, 2002). El aumento de la participación de las mujeres en los organismos de la CMNUCC y el Protocolo de Kyoto son esenciales para el diseño de las políticas, en términos de la promoción de mejorar la situación de inequidad de género. En la séptima Conferencia de las Partes (COP7), bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(CMNUCC) celebrada en Marrakech, Marruecos, del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001, el delegado de Samoa pidió una representación más equitativa de las mujeres dentro de la estructura organizativa y de toma de decisiones de la CMNUCC en el 2001.

Sin embargo, garantizar la participación de las mujeres en estos debates no asegurará que los muchos problemas que enfrentan las mujeres en la pobreza sean resueltos. La pobreza está vinculada de manera compleja a exclusión y marginación, lo cual es resultado de la carencia de análisis de los problemas que se enfrentan, en la formulación de políticas macroeconómicas. La pobreza lleva a que las mujeres y los hombres no puedan tomar decisiones que puedan mejorar su situación socioeconómica y tener condiciones para garantizar su seguridad y proteger los recursos naturales (Denton, *op.cit.*).

La mayoría de los datos recolectados y compartidos por las agencias de ayuda internacional toma al menos uno o dos años para obtener los resultados de las encuestas para que estén disponibles para el acceso público y esto restringe las posibilidades de análisis. Una de las razones que más dificulta la presente investigación, en términos de identificar a nivel mundial y nacional, la cuantificación en riesgos que existe es la ausencia de

estudios separados por sexo, lo cual podría ser explicado por falta de metodología en el momento en que se obtienen los datos, al ocurrir una catástrofe. Es decir, existen pocos trabajos que presenten datos cuantitativos separados por sexo (mortalidad, morbilidad).

Considerando que los conceptos de pobreza, raza, desastres naturales, hacen apariciones regulares en el análisis científico social del CCG, no se puede decir lo mismo para el género. Existe aún, una pequeña cantidad de trabajos con perspectiva de género; los existentes pertenecen principalmente a la ONU y ONG's, sin embargo, se hace imprescindible el llevar a cabo investigaciones en las zonas de desastres por país, con mayor vulnerabilidad ante el CCG.

Está claro que las mujeres principalmente enfrentan un aumento en los problemas sociales y económicos ante los desastres naturales y emergencias. Es decir, que las condiciones preexistentes de la inseguridad socioeconómica son elementos cruciales que componen sus efectos a nivel local (Aoláin, 2011). Asumir que la mujer es más “cercana a la naturaleza” que el hombre y por ello, determinar que las mujeres deben asumir la responsabilidad de proteger el ambiente exclusivamente, sin recibir ningún incentivo económico, no sólo es cuestión de injusticia, sino

que además se les asigna que deben servir a sus familias o comunidades, lo cual hace aún más vulnerable la situación de las mismas, puesto que dependen directamente de las decisiones que toman los hombres (ONU, 2014).

El empoderamiento femenino es una alternativa hacia la adaptación ante la vulnerabilidad del CCG, ya que en la medida en que las mujeres puedan ser autosuficientes económicamente y tengan acceso a la fuerza laboral, podrán tener acceso también a la información sobre los riesgos a las que están expuestas —ellas y sus familias— y podrán aplicar las estrategias de adaptación y de mitigación ante los efectos del CCG. Un ejemplo que puede ser aplicado en las zonas rurales de México, es el del norte de Ghana, donde se ha trabajado con las comunidades para promover la integración de adaptación al CCG en procesos de planificación del desarrollo participativo (CARE, 2010). En este proyecto, se apoya a mujeres para que asuman roles de liderazgo en la comunidad y en organizaciones, lo cual reduce la vulnerabilidad, aminorando así la desigualdad en su entorno local.

La mitigación es un problema global que requiere la participación de cada uno de los habitantes de este planeta. La adaptación por otra parte, es un problema regional o local y es por ello que requiere de analizar el modelo de desarrollo

seguido hasta ahora, para corregir muchos de los factores de vulnerabilidad. El proceso de análisis de riesgo climático ofrece la oportunidad de actuar en forma preventiva, reduciendo las posibilidades de desastres ante un clima siempre cambiante. Por lo que, de acuerdo con la ubicación se debe considerar el diseño de Planes de Desarrollo, Políticas Públicas y apoyo en la generación de una cultura ambiental y en el establecimiento de estrategias de mitigación y adaptación a la vulnerabilidad de las mujeres, ante el CCG (Quintanilla-Montoya y Zizumbo, 2014). Asimismo, se deben explorar las posiciones discursivas facilitadas por los desastres y considerar como se asumen éstos y/o se resisten por parte de los tomadores de decisiones. Tomar en cuenta las vulnerabilidades de las mujeres y las fortalezas durante una catástrofe y considerar otras dimensiones como la forma en que se cruzan con las desigualdades de raza, etnia, clase, edad y capacidad física, no sólo son necesarias de conocer, sino son determinantes en vías de mitigar la vulnerabilidad y de crear las debidas estrategias de adaptación ante los riesgos del CCG.

En el evento fue organizado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el INECC y la Sexta Comunicación Nacional, llevado a cabo en México (2018), se presentaron las metodologías de participación social con enfoque de

género que se utilizaron en los siguientes proyectos: *Humedales*, coordinado por el INECC; el *Proyecto de Conservación de Cuencas Costeras en el Contexto de Cambio Climático (C6)*, en el cual participa como socio el INECC. También, se expusieron diversas experiencias realizadas en Yucatán y en Chiapas además de metodologías sobre elaboración de mapas de riesgos comunitarios, realizados en el marco del *Proyecto Humedales*, así como también se expusieron casos donde se trabajaron en identificar necesidades y propuestas para el desarrollo de políticas públicas con un enfoque de derechos; como fueron los talleres con niñas, niños y adolescentes que se llevó a cabo entre el INECC y UNICEF en Tabasco en meses pasados. Las ponentes enfatizaron que la adaptación es una construcción colectiva, que surge de lo local y que necesariamente tiene que retomar al conocimiento tradicional. Los proyectos presentados mostraron que éstos han dejado atrás la visión asistencialista o solo centrada en atender las necesidades prácticas de las mujeres para pasar a detonar procesos de fortalecimiento de capacidades que atienden la formación de líderes y el empoderamiento de las mujeres.

México no posee ningún mecanismo y/o estrategia de difusión sobre los impactos que tiene el Cambio Climático Global en nuestro país.

Asimismo, no se tiene un mapa de riesgos por regiones, por ende, un paso importante y necesario para generar propuestas de adaptación y mitigación, es proporcionar información a la población en general sobre los diferentes aspectos que giran en torno a este fenómeno, para colocarlo en la agenda pública. Lo anterior permitiría que la ciudadanía y a los tomadoras/es de decisiones desarrollen acciones, con una visión integral, desde sus ámbitos de competencia, las cuales sean eficaces para resolver el problema y para adaptarse a los cambios generados por el fenómeno global, desde un enfoque integral que considere el componente social y humano del cambio climático y las necesidades específicas de diseñar políticas públicas enfocadas a disminuir la vulnerabilidad de género, o al menos, a difundir los aspectos que la definen, en vías de que las propias mujeres puedan participar y diseñar las propias y aquéllas que conciernen a sus comunidades.

#### **4. Conclusiones**

En el mundo existen 15 millones de niñas nunca aprenderán a leer y a escribir y 300,000 mujeres mueren anualmente por causas relacionadas al embarazo. En América Latina, hay 124 mujeres que viven en extrema pobreza por cada 100 hombres y

en Colombia, casi el 50% de mujeres en hogares rurales no tienen acceso a la asistencia médica cuando van a dar a luz.

Las mujeres tienen mayor tasa de mortalidad durante los desastres naturales relacionada con aspecto socio-culturales. Su estatus de pobreza y subordinación en distintas culturas tales como: estado marital, código de vestimenta, responsabilidad de la esfera familiar, carencia de aprendizaje de nuevas habilidades (nadar, trepar árboles, estudios), menor acceso a la información para crear estrategias de supervivencia ante la vulnerabilidad ante riesgos del CCG; entre otros. El tipo de eventos meteorológicos que conlleva a un mayor deceso en mujeres, son las inundaciones, ciclones y huracanes.

Las mujeres padecen mayor marginación en todos los entornos (sociales, económicos y naturales). En el aspecto social, es mayor el número de mujeres refugiadas tras una catástrofe, y son éstas mismas, quienes sufren de agresión física, estrés postraumático, alta incidencia de enfermedades sexuales y violación. Asimismo, en el aspecto económico, éstas se afectan al no tener un trabajo remunerado, sino el deber de cuidar a su familia y ancianos. Y en el aspecto ambiental, de acuerdo al tipo de desastre, afectan sus cultivos si fueron inundados, aumento de carencia en la obtención de



los recursos naturales, inadaptación de especies animales y plantas. Dificulta la obtención de recursos naturales.

Las actividades que agencias internacionales y ONGs han implementado en grupos de mujeres, dentro de actividades hacia la adaptación y mitigación al cambio climático, aumentan las habilidades y capacidades de las mismas, para hacer frente y reducir su vulnerabilidad. Estos programas promueven el continuo aprendizaje a estas de nuevas habilidades y con ello a utilizar planes de emergencia cuando se encuentren en un peligro natural.

La preparación para el cambio en los diferentes entornos (económico, ecológico y social) debido al CCG debe ser principalmente abordado a nivel local. Es decir, se deben tener bien identificadas las zonas y los grupos más vulnerables para determinar sus necesidades particulares, por zona y por grupo. Asimismo, es necesario diseñar y planificar las estrategias en cada municipio, en cada estado y a nivel nacional para que los tomadores de decisiones promuevan la disminución de la vulnerabilidad, con base en la participación activa de los diferentes sectores de la sociedad, tanto a nivel comunidad, como municipal y/o estatal.

El trabajo interno dentro de las comunidades es indispensable, pues son las personas las que conocen

mejor los sitios que habitan, los riesgos que tienen y ellos pueden participar activamente en la promoción de estrategias de adaptación y de mitigación ante los riesgos que presenta en CCG; de esta manera podrán sobrellevar la situación de mejor manera. Específicamente, debe existir el diseño e implementación de planes de mitigación en los riesgos, para las mujeres, los niños y los ancianos, quienes son los más afectados, y por ende, también son los más vulnerables.

Es necesario y urgente, el proporcionar información a la población en general sobre los diferentes aspectos que giran en torno a este fenómeno, para colocarlo en la agenda pública. Lo anterior permitiría que la ciudadanía y a los tomadoras/es de decisiones desarrollen acciones, con una visión integral, desde sus ámbitos de competencia, las cuales sean eficaces para resolver el problema y para adaptarse a los cambios generados por el fenómeno global, desde un enfoque integral que considere el componente social y humano del cambio climático y las necesidades específicas de diseñar políticas públicas.

Es evidente que las mujeres están ausentes del proceso de toma de decisiones sobre cambio climático. El debate climático no ha tratado de abordar la marginación existente de las mujeres, ni su necesidad de integrarla en las políticas

ambientales. Es importante resaltar falta de participación de las mujeres en la toma de decisiones a todos los niveles, y el hecho de que el debate climático hasta ahora ha hecho poco esfuerzo para agrupar los problemas en una forma en que la gente común puede incluso entender, y mucho menos participar.

## Referencias

- Aguilar-Revelo, Lorena. 2021. “La igualdad de género ante el cambio climático: ¿qué pueden hacer los mecanismos para el adelanto de las mujeres de América Latina y el Caribe?”, serie Asuntos de Género, N° 159 (LC/TS.2021/79), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Álvarez-Cervantes, Rocío Sinaíd. 2016. Situación actual de las mujeres ante los fenómenos, meteorológicos relacionados con el cambio climático global. Tesis de Posgrado en la Especialidad en Ciencias del Ambiente, Gestión y Sustentabilidad. Facultad de Ciencias, Universidad de Colima. Octubre.
- Aoláin, F. N. 2011. Women, Vulnerability, and Humanitarian Emergencies. *Mich. J. Gend. Law* 18, 1–23.

- Arlikatti, S., Peacock, W. G., Prater, C. S., Grover, H. & Sekar, A. S. G. 2010. Assessing the impact of the Indian Ocean tsunami on households: A modified domestic assets index approach. *Disasters* 34, 705–731.
- Baden, S., Green, C., Marie Goetz, A. & Guhathakurta, M. 1994. Background Report on Gender Issues in Bangladesh. *Bridge development-gender* 44.
- Basaglia, Franca. 1982. *Una Voz. Reflexiones sobre la mujer*, Universidad Autónoma de Puebla.
- Biskup, J. L. y Boellstorff, D. L. 1995. The Effects of a Long-Term Drought on the Economic Roles of Hacendado and Ejidatario Women in a Mexican Ejido. *Nebraska Anthropol.* 12, 7–13.
- Buechler, S. 2009. Gender, water, and climate change in Sonora, Mexico: implications for policies and programmes on agricultural income-generation. *Gend. Dev.* 17, 51–66.
- Cabello Martínez, M.J. & Martínez Martín, I. (2017). Aportes teóricos de la perspectiva de género en la mejora de la educación de las niñas en África. [Theoretical contributions of the gender approach to improve education for African girls]. *Educación XX1*, 20(1), 163-181, doi: 10.5944/educXX1.14474.

- Cannon, T. 1994. Vulnerability Analysis and the Explanation of 'Natural' Disasters. *Disasters, Development and Environment* Vol(13)–30 (1994). doi:10.1108/09653560810887275
- CARE. 2010. Informe sobre Cambio Climático. Adaptación, Género y Empoderamiento femenino. Sitio en Web: ([https://www.cac.int/sites/default/files/CARE.\\_Adaptacion\\_genero\\_y\\_empoderamiento\\_femenino..pdf](https://www.cac.int/sites/default/files/CARE._Adaptacion_genero_y_empoderamiento_femenino..pdf))
- Dankelman, I. 2002. Climate change: Learning from gender analysis and women's experiences of organising for sustainable development. *Gend. Dev.* 10, 21–29.
- De Beauvoir, Simone. 1949. *Le Deuxième Sexe*, París, Francia. Editorial Gallimard.
- Denlay, P. and W. B. & Shrader, E. 2000. The W. B. Gender and Post-Disaster Reconstruction: The Case of Hurricane Mitch in Honduras and Nicaragua.
- Denton, Fatma (2002) Climate change vulnerability, impacts, and adaptation: Why does gender matter?, *Gender & Development*, 10:2, 10-20, Sitio en Web: <https://doi.org/10.1080/13552070215903>
- Eklund, L & Tellier, S. 2012. Gender and international crisis response: Do we have the data, and does it matter?' *Disasters*, Vol. 36, no. 4, pp. 589-608.

- EM-DATA. 2019. The International Disaster Data Base. Center for research and epidemiology disasters. Belgium. Disponible en: <https://www.emdat.be/>
- Enarson, E. & Morrow, B. in *The gendered terrain of disaster: Through women's eyes* 1–10 (1998)
- FAO. 2013. *Guía de Capacitación: Investigación del género y cambio climático en la agricultura y la seguridad alimentaria para el desarrollo*. Sitio en Web: (<http://www.fao.org/3/a-i3385s.pdf> )
- Fondo Global Greengrants. 2015. *Justicia Climática y Derechos de las Mujeres: Una Guía para Apoyar la Acción Comunitaria de Mujeres*. Sitio en Web: (<http://genderandenvironment.org/wp-content/uploads/2015/03/Justicia-Climatica-y-Derechos-de-las-Mujeres.pdf> )
- Heudtlass, P., Speybroeck, N. & Guha-Sapir, D. 2016. Excess mortality in refugees, internally displaced persons and resident populations in complex humanitarian emergencies (1998–2012) – insights from operational data. *Confl. Health* (10)15.
- Hobfoll, S. E., & Lilly, R. S. (1993). Resource conservation as a strategy for community psychology. *Journal of Community Psychology*, 21(2), 128-148. Sitio en Web: <http://dx.doi.org/10.1002/1520-6629>

(199304)21:2<128::AID-  
JCOP2290210206>3.0.CO;2-5

Ide, V. Confrontación, machismo y democracia: representaciones del ‘heroísmo’ en la polarización política en Venezuela. *Rev. Venezonala Econ. y Ciencias Soc.* 10, 137–153 (2004).

IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Resumen para responsables de políticas públicas. Disponible en: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) ISBN 978-92-9169-351-1.

IPCC (Inter Panel Gubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2019. Calentamiento Global de 1.5° C. OMM-PNUMA. ISBN 978-92-9169-351-1. Sitio en Web: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf)

Ipade, F. Guía Básica Sobre el cambio climático y cooperación para el desarrollo. Fundacion para el Dearrollo ipade (2014). doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2

Lagarde, M. (2012). Las leyes de violencia de género en México: medidas de prevención y sensibilización. *Revista Electrónica de Derecho de la Universidad de La Rioja (REDUR)*, (10), 253-275.

Leyser-Whalen, O., Rahman, M. & Berenson, A. B. 2011. Natural and social disasters: racial

- inequality in access to contraceptives after Hurricane Ike. *J. Womens Health* (Larchmt). 20, 1861–6.
- MacGregor, S. 2010. ‘Gender and climate change’: from impacts to discourses. *J. Indian Ocean Reg.* 6, 223–238 (2010).
- Martins, Alejandra. 2018. Por qué en casos de desastres climáticos "el 80% de las víctimas son mujeres". BBC News Mundo. Sitio en Web: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44454334>
- Mujer y Medio Ambiente, A.C. 2010. Género y Cambio Climático en México: ¿En dónde está el debate? Sitio en Web: (<https://mx.boell.org/sites/default/files/generoycambiodocrebe.pdf>)
- Najarian, L. M., Jonjean, A. K., Pelcovitz, D., Mandel, F. & Najarian, B. 2001. The effect of relocation after a natural disaster. *J. Trauma. Stress* Vol. 14, 511–526.
- Neher, F. & Miola, A. 2015. The role of social inequalities for the vulnerability to climate related extreme weather events. (doi:10.2788/267540)
- Nelson, V., Meadows, K., Cannon, T., Morton, J. & Martin, A. 2002. Uncertain predictions, invisible impacts, and the need to mainstream gender in climate change adaptations. *Gend. Dev.* 10, 51–59 p.



- ONU. 2009. Women, Gender Equality and Climate Change. The UN Internet Gateway on Gender Equality and Empowerment of Women.
- ONU. 2014. Gender Equality and Sustainable Development. World Survey on The Role of Women in Development 2014 (doi:10.4324/9781315686455)
- ONU-CEPAL. 2016. La pobreza tiene rostro de mujer. Noticias ONU: Mirada Global. Sitio en Web:<https://news.un.org/es/story/2016/10/1367471>
- ONU. 2018. Las mujeres están por debajo de los hombres en todos los indicadores de desarrollo sostenible. Noticias ONU: Mirada Global, sitio web:<https://news.un.org/es/story/2018/02/1427081>
- ONU. 2020. The Beijing Platform for action, turn 20. Sitio en Web: (<https://beijing20.unwomen.org/es/in-focus/poverty>)
- Oswald Spring Úrsula. 2013. “Seguridad de género”, en Flores, F. (Coord.), Representaciones sociales y contextos de investigación con perspectiva de género, Cuernavaca, CRIM-UNAM, pp. 225-256.
- Oswald Spring, Ú.; Serrano, S.E. y Estrada, A. 2014. Vulnerabilidad social y género entre migrantes ambientales, Cuernavaca, CRIM-UNAM.
- Oswald Spring, Úrsula (2016). Perspectiva de género ante el Cambio Climático y la doble vulnerabilidad. *Revista Internacional de Ciencias*

*Sociales y Humanidades, SOCIOTAM, XXVI(2)*, undefined-undefined. [fecha de Consulta 15 de Octubre de 2019]. ISSN: 1405-3543. Sitio en Web:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=654/65456042008>

OXFAM (2009). Evidencia que duele: el cambio climático, la gente y la pobreza. Informe escrito por Alex Renton, con apoyo de Matt Grainger, Anna Mitchell, Frida Eklund, Rob Bailey, Steve Jennings y John Magrath. Publicado en Julio 2009. Disponible en: [https://oxfamilibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/114606/bp130-suffering-science-0\\_1?sequence=7](https://oxfamilibrary.openrepository.com/bitstream/handle/10546/114606/bp130-suffering-science-0_1?sequence=7)

OXFAM (2014). El tsunami del océano índico, 10 años después: Lecciones aprendidas y retos persistentes en la financiación humanitaria. Publicado el 18 de Diciembre de 2014. [www.oxfam.com](http://www.oxfam.com), Disponible en: [https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/file\\_attachments/el\\_tsunami\\_del\\_oceano\\_indico\\_10\\_anos\\_despues.pdf](https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/file_attachments/el_tsunami_del_oceano_indico_10_anos_despues.pdf)

Perus, M. C. 2012. Machismo y ginecocracia : la familia mexicana y latinoamericana como forma mixta. *Intersticios Soc.* 3, 1–28.

Philen, R. M. 1992. Hurricane Hugo-Related Deaths: South Carolina and Puerto Rico, 1989. *Disasters* 16, 53–59.

- PNUD. 2008. Guía de Recursos de Género para el cambio climático. Sitio en Web: (<http://www.cinu.mx/minisitio/cop16/Guia%20Recursos%20de%20G%C3%A9nero%20para%20el%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf>).
- Quintanilla-Montoya, Ana Luz y Lilia Zizumbo-Villareal, 2014. Imprescindible y urgente, la inclusión de una visión de Género ante la vulnerabilidad y hacia la adaptación del Cambio Climático Global. Memorias del Congreso de ALAS (2014), San José de Costa Rica.
- Quintanilla-Montoya, A.L. 2019. ¿Cambia el clima o lo estamos cambiando?. Rapidín de divulgación científica publicado por la Dirección de Publicaciones de la Universidad de Colima (en prensa). 45p.
- Reid, M. 2012. Women Confronting Natural Disaster: From Vulnerability to Resilience by Elaine Enarson. *American Journal of Sociology* 118, 840--842 CR-- Copyright &#169; 2012 The Universit.
- Rubín, Gayle. 1996. "El tráfico de mujeres: notas sobre la economía política del sexo". En *El género: la construcción cultural de la diferencia sexual*, compilado por Marta Lamas, 35–98. México: PUEGUNAM, 1996.
- Salazar, H., Perevochtchikova, M. & Martín, A. 2013. Cambio climático, agua y género. Retos

- México frente al cambio climático. Una Mirada género.
- Samenow, J. Female-named hurricanes kill more than male hurricanes because people don't respect them, study finds. *The Washington Post* (2014).
- Sherbinin, Alex de, Koko Warner and Charles Ehrhart. 2011. Casualties of Climate Change. *Scientific American* Vol. 304, No. 1 (January 2011), pp. 64-71.
- Steckley, M. & Doberstein, B. 2011. Tsunami survivors' perspectives on vulnerability and vulnerability reduction: Evidence from Koh Phi Phi Don and Khao Lak, Thailand. *Disasters* 35, 465–487.
- Suva, P. R. in. 2014. Why gender disaster data matters: 'In some villages, all the dead were women'. *The Guardian*.
- Thacker, M. T. F., Lee, R., Sabogal, R. I. & Henderson, A. Overview of deaths associated with natural events, United States, 1979 – 2004. Blackwell Publ. 303–316 (2008). doi:10.1111/j.0361
- UNESCO. 2011. Migration and Climate Change. Edited by Etienne Piguet, Anoine Pecoud and Paul de Kitchenware. UNESCO, Cambridge University Press, México.

- Walther, Gian-Reto, Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, T., Beebee, J.C. and Jean-Marc Fromentin, Hoegh-Guldberg, O. and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to climate change. *Nature* Vol. 416, March 2002. 389-395p.
- Wisner, B., Fordham, M., Kelman, I. Rose Johnston, B., Simon, D., Lavell, A., Günter Brauch, H., Oswald Spring, U., Wilches-Chaux, G., Moench, M., and Daniel Weiner. 2007. Cambio Climático y Seguridad Humana. Sitio en Web:(<http://www.desenredando.org/public/articulos/2007/clim-change/CCySH.pdf> )
- Worldometer poblacional. 2019. Disponible en: <https://www.worldometers.info/world-population/>
- Yeo, S. W. & Blong, R. J. 2010. Fiji's worst natural disaster: The 1931 hurricane and flood. *Disasters* 34, 657–683
- Yin, JianJun, Overpeck, Jonathan, Peyser Cheryl and Ronald Stouffer. 2018. Big jump of record warm global mean surface temperature in 2014–2016 related to unusually large oceanic heat releases. *Geophysical Research Letters*, Volume 45(2), 1069-1078 p.

La vida de los seres humanos está en la esfera de lo contingente. Lo ha sido, lo es y lo será. La gran mayoría de los esfuerzos humanos para ejercer el control y el dominio sobre la naturaleza ha tenido costos; la mayoría de ellos no pueden considerarse menores. Y a pesar de estas afirmaciones, más allá de que alguien solicite evidencias al respecto, dichas solicitudes provienen de nuestro engreimiento, teñido por un optimismo desmedido por la ciencia institucionalizada, sus múltiples aplicaciones y porque, seguimos confiando demasiado en la idea de progreso. Esta confianza inmoderada por las formas de aplicabilidad e institucionalización de la ciencia, pueden formar parte de las distintas razones de la crisis ambiental que sufre nuestro planeta. Sabemos entonces, que dicha crisis, es resultado de las diferentes prácticas, en donde lo humano y lo "natural" se declaran como diferentes. La cuestión es: ¿Esto es así?

Estos argumentos, por más vagos que parezcan, nos permiten establecer soportes para abordar un conjunto de temáticas ubicadas en el margen de los estudios sobre la sustentabilidad, así como sus manifestaciones en el uso cotidiano de la humanidad. Para ello, se plantean dos puntos de partida, uno trascendental y otro epistemológico. Sobre los capítulos que conforman esta obra, se trata de investigaciones originales trabajadas por expertos en la materia, académicos y estudiantes del posgrado de Ciencias Ambientales con sede en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx).

Esta pequeña pincelada del contenido que abarca la presente obra da cuenta de la importancia de estudiar las ciencias ambientales –desde la inter y transdisciplinariedad–, ante la crisis ambiental y sanitaria que actualmente padecemos como especie. ¿Cómo sobrevivir ante un sistema que pareciera propiciar su propia autodestrucción?, ¿qué podemos hacer desde nuestra vida cotidiana para aminorar dicho exterminio? Estas interrogantes esperamos puedan ser respondidas y ampliadas con las reflexiones que deseamos fomentar en este libro, y con los cuestionamientos que seguramente les surgirán a partir de su lectura.



ISBN: 978-607-8702-84-8



9 786078 702848

Elia Alejandra Teutli Sequeira · Vanessa González Hinojosa  
(Coordinadoras)

LA ESFERA DE LA VIDA :

DE LA EPISTEMOLOGÍA AMBIENTAL  
A LA INTER Y TRANSDISCIPLINARIEDAD.  
TÓPICOS EN CIENCIAS AMBIENTALES