



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

---

# LOS FÁRMACOS COMO CONTAMINANTES EMERGENTES PRESENTES EN AGUAS

---

TRABAJO MONOGRÁFICO  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERA AMBIENTAL**

PRESENTA

**KARIME MONSERRAT SANSORES CASTILLO**

DIRECTOR

**M.E.M. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO**

ASESORES

**DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ**

**DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS**

**M.E.M. WALTER MAGAÑA LANDERO**

**DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO MONOGRÁFICO TITULADO

### **“LOS FÁRMACOS COMO CONTAMINANTES EMERGENTES PRESENTES EN AGUAS.”**

ELABORADO POR

KARIME MONSERRAT SANSORES CASTILLO

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y  
APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

### **INGENIERA AMBIENTAL**

#### COMITÉ DE SUPERVISOR

SUPERVISOR: M.E.M. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BUCIO

SUPERVISOR: DR. JOSÉ MANUEL CARRIÓN JIMÉNEZ

SUPERVISOR: DR. VICTOR HUGO DELGADO BLAS

SUPERVISOR: M.E.M. WALTER MAGAÑA LANDERO

SUPERVISOR: DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA

Handwritten signatures of the five supervisors listed on the left, including José Luis González Bucio, José Manuel Carrión Jiménez, Victor Hugo Delgado Blas, Walter Magaña Landero, and Joel Omar Yam Gamboa.



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, JUNIO DE 2022

## Dedicatoria

Principalmente a Dios por llegar a este momento tan especial y permitirme concluir. A mi abuelita María del Socorro quien ha sido el pilar de mi vida y me ha acompañado en todo momento, dándome los mejores consejos por cada etapa que he pasado y me ha ayudado a no rendirme nunca. A mi familia quienes me motivaron a lo largo de mi carrera universitaria a dar lo mejor de mí y ser siempre perseverante sin importar que tan difíciles se vean las cosas.

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al M.E.M. José Luis González Bucio quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de este proyecto para lograr los resultados que buscaba.

Al Dr. José Alfonzo Canche Uuh quien fue mi tutor y con sus palabras me motivó a siempre continuar y por tener tiempo de escucharme cuando lo necesité.

A todos los profesores de la universidad por ayudarme en mi proceso educativo y por su continuo apoyo. Sus consejos fueron siempre útiles y su gran sabiduría me enseñó mucho.

Por último, quiero agradecer a mi familia que me dio su incondicional apoyo. Y a mis amigos con quienes pasé noches de desvelo y horas de estudio, pero con quienes siempre tuve muchos momentos de alegría.

## Introducción

La industria farmacéutica es uno de los sectores de la economía general que se dedica de manera exclusiva a la fabricación, distribución, comercialización y también la preparación de productos químicos farmacéuticos. Este sector está formado por diversas organizaciones de índole privado y público, cuyo objetivo y finalidad es satisfacer las necesidades de salubridad en humanos y animales a través de una gran gama de medicamento. En el siglo XX la medicina eliminó muchas enfermedades, aumentando así la esperanza de vida, esto debido al descubrimiento de las vacunas antitetánica y antidiftérica. Un estudio realizado por Lichtenberg (2014) determinó que la innovación del sector farmacéutico aumentó la esperanza de vida hasta en 1.73 y 3.7 años en los países con mayor demanda de medicamentos. Es así, que, con la creación de los medicamentos, se consigue curar enfermedades tales como: sarampión, malaria y hepatitis C, e incluso son enfermedades que pueden llegar a erradicarse, por ejemplo, la polio, la viruela y la peste bovina (Confederación Española de Organizaciones Empresariales [CEOE], 2019).

Las aguas residuales provenientes de esta industria, presentan variabilidad en su cantidad y componentes. En este sentido, y debido a que se presentan distintas modalidades en las operaciones, la generación de residuos es variada en concentración y en composición. De igual modo, la composición del agua vertida al medio ambiente varía en función del proceso por el cual sea derivado. Se intuye entonces, que la cantidad de residuos farmacéuticos vertidos puede ser baja, pero su entrada continua al ecosistema, puede aumentar la concentración de contaminantes en los cuerpos de agua, lo que genera a largo plazo un riesgo para los organismos acuáticos y terrestres. De esta forma, se puede establecer que el problema primordial es la carencia tanto de técnicas como de tecnologías,

que permitan además de tratar, conocer los componentes y concentraciones del agua residual para esta industria (Jaime y Vera,2020).

Los contaminantes emergentes (CEs, del inglés Emerging Contaminants) se definen como materiales, elementos, compuestos, especies químicas, e incluso fenómenos físicos desconocidos o no reconocidos cuya presencia en el medio ambiente, en alimentos o agua, en cualquier producto natural o artificial, o en cualquier ser vivo, no es necesariamente nueva, pero sí lo es el conocimiento de las posibles consecuencias perjudiciales de su existencia (Cuenca, 2019).

En el presente trabajo se presenta una recopilación de información de diversos estudios, normas, publicaciones e investigaciones relacionado con los contaminantes emergentes, con el propósito de conocer más sobre este tema debido a que si bien no es reciente, aún falta mucho por investigar y conocer al respecto.

A partir de 1965, comenzó a aumentar la preocupación por la posible presencia de productos farmacéuticos y de higiene personal en los suministros de agua. Por primera vez, investigadores de la Universidad de Harvard determinaron la existencia de estrógenos de origen natural y sintético en el agua efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales. Haciendo así que en la década de 1970 este tema se estudiara tanto en los Estados Unidos como en Europa.

Desde algunos años atrás se ha tomado interés por una amplia gama de materiales bioactivos en los ambientes naturales y humanos, debido a su constante presencia en el medio ambiente y a sus posibles riesgos tanto para la salud humana como sus consecuencias para el medio ambiente. Los contaminantes emergentes “son compuestos sintéticos o naturales e incluyen productos farmacéuticos, hormonas, compuestos

disruptores endócrinos (EDC del inglés Endocrine Disrupting Compounds), toxinas derivadas de algas, compuestos organometálicos, plaguicidas y una amplia variedad de subproductos del proceso de desinfección del agua” (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015).

En relación con el marco regulatorio internacional se encuentran la Resolución de cooperación internacional para disruptores endócrinos (2000), Resolución de cooperación internacional para orgánicos persistentes (2004) de la Comisión Europea. Una lista de 47 sustancias prioritarias y una clasificación de 6 contaminantes emergentes (retardantes de llama bromados, parafinas cloradas, pesticidas polares, perfluorados, fármacos y drogas) a regular para el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España.

Los contaminantes emergentes en agua son aquellos químicos descubiertos en concentraciones significativamente superiores a las esperadas y que su presencia, frecuencia de ocurrencia, así como su origen desconocido significan un riesgo a la salud del hombre y el medio ambiente de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Una de las características de estos contaminantes es que debido a su introducción continua en el ambiente causan efectos negativos, estos compuestos entran al ambiente a través de algunas fuentes y vías como aguas residuales tipo doméstico e industrial, residuos de plantas de tratamiento, efluentes hospitalarios, de las actividades agrícolas y ganaderas y de los tanques sépticos.

## ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1 Objetivo general.....	5
Capítulo 2. Objetivos específicos.....	5
Capítulo 3. Los contaminantes emergentes.....	5
3.1 Los fármacos como contaminantes emergentes.....	10
3.1 Legislación internacional.....	12
3.2 Legislación nacional.....	16
Capítulo 4. Principales afectaciones de los contaminantes emergentes.....	21
4.1 Afectaciones en la biota.....	21
4.2 Afectaciones a la salud humana.....	30
Capítulo 5. Presencia y tratamiento.....	33
5.1 Contaminantes emergentes presentes en aguas.....	33
5.2 Fármacos encontrados en aguas.....	39
5.3 Eliminación de los contaminantes emergentes.....	47
Conclusiones.....	50
Referencias.....	52

## Capítulo 1 Objetivo general

- Describir los contaminantes emergentes y su marco regulatorio internacional y nacional.

## Capítulo 2. Objetivos específicos

- Mencionar la importancia de conocer los contaminantes emergentes en las posibles afecciones a la biota y a la salud humana.
- Indicar que contaminantes emergentes se han encontrado en fuentes de abastecimiento y en plantas de tratamiento.
- Relacionar los fármacos como contaminantes emergentes.

## Capítulo 3. Los contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes (ECs, del inglés Emerging Contaminants) se definen como materiales, elementos, compuestos, especies químicas, e incluso fenómenos físicos desconocidos o no reconocidos cuya presencia en el medio ambiente, en alimentos o agua, en cualquier producto natural o artificial, o en cualquier ser vivo, no es necesariamente nueva, pero sí lo es el conocimiento de las posibles consecuencias perjudiciales de su existencia. (Cuenca, 2019).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha definido a los ECs como: “químico o material que se presenta como un amenaza potencial o real para la salud humana y/o medioambiental o para los que existe una falta de normas vigentes de salud”. Se trata en muchos casos de sustancias de uso cotidiano, productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), plastificantes, pesticidas, retardantes de llama, drogas de

abuso, surfactantes, nanomateriales, entre otros (incluyendo posibles derivados, metabolitos o productos de transformación). Son contaminantes orgánicos (OCs), inorgánicos y organometálicos que, al ser producidos a escala industrial de manera indiscriminada, están presentes en las diferentes matrices del medio ambiente. Algunos de ellos son persistentes (pudiendo ser clasificados como contaminantes orgánicos persistentes, POPs) permaneciendo inalterados por un largo tiempo. Dependiendo de la matriz, un contaminante se considera persistente si su vida media es superior a 2 meses (para aguas) o 6 meses (suelos y sedimentos). Sin embargo, no es una característica necesaria, los ECs, que son susceptibles a biodegradación, son introducidos constantemente al medio ambiente debido a una producción masiva y un consumo elevado. Es más, en algunos casos, los ECs pueden biodegradarse en intermedios que pueden ser más tóxicos para el medio ambiente que sus precursores. Por consiguiente, el problema de los ECs se agudiza aún más. (González, 2016).

Los contaminantes emergentes comprenden una extensa gama de compuestos químicos, productos farmacéuticos, de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales, que no se encuentran incluidos dentro de los programas de monitoreo y tratamiento de aguas, incluyendo la síntesis de nuevos compuestos químicos o cambios en el uso y disposición de los productos químicos ya existentes, de los cuales existe poca información disponible sobre los efectos que pueden generar en la salud humana y los ecosistemas (Jacobo-Marín y Santacruz, 2021).

Se distinguen diferentes tipos de ECs (Cuenca, 2019):

- Contaminantes orgánicos persistentes (COPs): tales como difenil éteres polidibromados, empleados en retardantes de llama, espuma para muebles, plásticos,

etc. Además de otros contaminantes orgánicos globales como los ácidos orgánicos perfluorados, los plaguicidas, insecticidas (DDT),

- Contaminantes de origen farmacéutico: provienen de productos farmacéuticos (p. ej., antidepresivos, antibióticos, ibuprofeno, paracetamol), en medicamentos veterinarios (p. ej., anti fúngicos, bactericidas, hormonas), drogas de abuso, agentes de diagnóstico, entre otros.
- Contaminantes procedentes de productos de cuidado personal: son productos de uso cotidiano como cremas, lociones, fragancias, cosméticos, suplementos nutricionales, etc.
- Nanomateriales, como nanotubos de carbono o dióxido de titanio en partículas de escala nanométrica.

Dentro de los ECs también se incluyen los subproductos derivados de las sustancias anteriores y los disruptores endocrinos (p.ej., estrógenos sintéticos y naturales, andrógenos).

Autores como Barceló y López mencionan que entre las clases de contaminantes emergentes que demandan una mayor y más urgente atención por la escasez de datos ambientales y ecotoxicológicos además de métodos para su análisis, y a las posibles consecuencias de su presencia en el medio ambiente se encuentran:

- Retardantes de llama bromados
- Cloroalcanos
- Pesticidas polares
- Compuestos perfluorados
- Fármacos

- Drogas de abuso, y
- Los metabolitos y/o productos de degradación de las clases de sustancias anteriores.

En la tabla 1 (Rivera, 2018) se muestra una lista de diferentes clases de compuestos y, señala que en su mayoría no son regulados por lo que podrían llegar a serlo en un futuro.

Tabla 1

Clasificación de contaminantes emergentes (Rivera, 2018, como se citó en Barceló, 2003)

Clase de compuestos	Ejemplo
1. Productos farmacéuticos	
Antibióticos	Trimetoprim, eritromicina, amoxicilina, ofloxacina, ciprofloxacina, lincomicina, sulfametoxazol, azitromicina, tilosin A, tilmicosin y cloranfenicol.
Analgésicos y anti-inflamatorios	Ketoprofeno, naproxeno, ibuprofeno, indometacina, diclofenaco, ácido mefenámico, acetaminofén, ácido salicílico y propifenazona.
Clase de compuestos	Ejemplo
Drogas psiquiátricas	Diazepam, doxepin, lorazepam, sertralina, alprazolam, citalopram, venlafaxina, carbamazepina.
Reguladores de lípidos	Bezafibrato, ácido clofibrico, ácido

	fenofibrico, gemfibrozil y atorvastatin.
Beta-bloqueadores	Atenolol, metoprol, nadolol, pindolol, propranolol, sotalol, betaxolol y carazolol.
2. Esteroides y Hormonas	
	Estriol, testosterona, estrona y 17- $\beta$ -estradiol.
3.Productos de cuidado personal	
Perfumes	Fragancias, policíclicos y macrocíclicos
Agentes de protección solar	Benzofenona, metilbencilideno alcanfor
Repelentes de insectos	N,N-dietiltoluamida.
4. Antisépticos	
	Triclosan, clorofeno.
5. Retardantes de flama	
	Difenil éteres polibrominados (PBDEs), Tetrabromo bisfenol A, Tris(2-cloroetil) fosfato.
6. Aditivos y agentes industriales	
	Agentes quelantes (EDTA), sulfonatos aromáticos.
7. Aditivos de la gasolina	
	Dialquil éteres, metil-t-butil éter (MTBE).
8. Subproductos de desinfección	
	Yodo-trihalometanos, bromoácidos,

---

bromoacetone nitrilos, bromoaldehídos,  
cianoformaldehído, bromato.

---

Nota: De “Investigación y evaluación de contaminantes emergentes (productos farmacéuticos) presentes en la cuenca del Río Apatlaco en el Estado de Morelos,” por Mica Rivera, 2018, Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/430>

En lo que se refiere a las clases de ECs como son los productos de cuidado personal y fármacos en México, no existe aún una legislación que regule estos contaminantes y aunque tampoco se ha definido un listado de contaminantes emergentes en el ambiente, Ramírez-Sánchez et al (2015) hace referencia a la cita de Muñoz (2012) quien propuso una lista de 49 contaminantes de importancia potencial en México en función de los volúmenes de uso, relevancia en la salud pública, interés en su acción toxicológica y preeminencia científica por su mecanismo de acción.

### 3.1 Los fármacos como contaminantes emergentes

Dentro de todos los compuestos mencionados anteriormente, de los más preocupantes son los fármacos, esto debido a que han sido encontrados tanto en aguas superficiales, subterráneas, e incluso en el agua potable. Lo anterior como evidencia de la importancia de la Valoración del Impacto Ambiental (VIA) de los fármacos en los recursos hídricos puesto que una gran parte de los que ingresan al ecosistema lo hacen a través de las aguas residuales urbanas y hospitalarias (Sánchez, 2015).

Tejada et al. (2014) describe que las primeras evidencias de la presencia de fármacos en el medio acuático se produjeron en los años 70 con la identificación en aguas

residuales en EE.UU. encontrando ácido clofibrico (metabolito activo de varios reguladores de lípidos en sangre) pero hasta principios de la década de los 90 que los fármacos en el medio ambiente comenzaron a despertar interés.

Henríquez (2012) menciona que, por sus características intrínsecas, los productos farmacéuticos son sustancias altamente solubles en agua, que se liberan al medio ambiente vía excreción, ya sea metabolizados o no metabolizados, por vertido de los productos no utilizados o caducados, o bien procedentes, como residuos, de los procesos de producción, por lo que pueden estar presentes en todas las etapas de un ciclo de vida del agua puntual y referido a su uso. Y, que si bien estos fármacos no son persistentes si se utilizan de manera frecuente y son vertidos añadiendo que los sistemas de tratamiento convencionales de agua potable y aguas residuales no logran eliminar estos productos lo que ocasiona un aumento de su concentración en el ecosistema.

En los últimos años, los fármacos son los ECs que han generado una mayor preocupación: su consumo en los países de la Unión Europea (UE) se cifra en toneladas por año y algunos se emplean en cantidades similares a las de los pesticidas (Baz, 2019).

Refiriéndonos a la UE se estima que están autorizados alrededor de 3000 principios activos, así mismo, Europa es el segundo mayor consumidor de medicamentos de uso humano (24% del total), por detrás de EE.UU. (55%). De acuerdo con información del boletín INFAC (2016) el consumo de medicamentos de uso humano y veterinario es muy variable entre los diferentes países europeos (50-150 g/persona/año en el caso de medicamentos de uso humano). Existiendo una gran diferencia tanto cuantitativa y cualitativa en cuanto a la eliminación de residuos de los medicamentos, y se estima que el 50% de los medicamentos no utilizados no se desecha adecuadamente.

### 3.1 Legislación internacional

Como se ha establecido anteriormente, la gran mayoría de ECs no se encuentra regulada a nivel europeo ni español y sólo algunos de ellos se han incluido en la lista de contaminantes prioritarios. Desde el año 2000 en Europa se han ido publicado algunas directrices como la Directiva 2000/60 / CE, con objeto de establecer un marco para la acción comunitaria en el campo de agua (Baz, 2019).

En países como Europa, se cuenta con reglamentos que contienen una lista de sustancias caracterizadas como peligrosas, así como se han publicado directrices como la Directiva 2000/60 / CE, la cual tiene como objetivo establecer un marco en el campo la política en el agua desde el año 2000. La Directiva UE avanzó en temas de la política de protección del agua con el fin de lograr un buen estado ecológico y químico en las aguas superficiales lo cual requirió que Comisión de la UE identificara las sustancias y/o grupo de sustancias prioritarias (PS) que podían representar un riesgo significativo para el medio ambiente acuático.

En 2001, la Decisión 2455/2001/EC estableció la primera lista de 33 SP para ser monitoreadas a nivel comunitario, algunas de las cuales fueron marcadas como Sustancias Peligrosas de Alta Prioridad (PHS). En la Directiva 2008/105/CE (14), la lista se amplía a otros 8 posibles contaminantes. Cinco años después, la 2013/39/EU actualizó el documento anterior, recomendando monitorear 53 PS, 49 sustancias orgánicas y 4 metales: cadmio, plomo, mercurio y níquel.

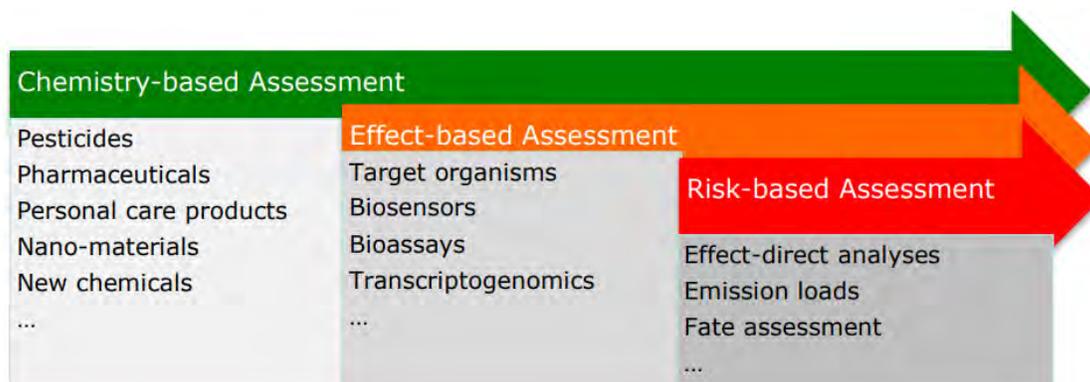
En el 2019, la Comisión se encargó de recopilar datos sobre una variedad de sustancias de las cuales podrían ser incluidas en la lista de vigilancia. El antibiótico sulfonamida sulfametoxazol y el antibiótico diaminopirimidina trimetoprima, el

antidepresivo venlafaxina y su metabolito O-desmetilvenlafaxina, un grupo de tres fármacos azólicos (clotrimazol, fluconazol y miconazol) y siete pesticidas azólicos (imazalil, ipconazol, metconazol, penconazol, procloraz, tebuconazol, tetraconazol), y los fungicidas famoxadona y dimoxistrobina fueron identificados como candidatos adecuados. La inclusión de varios productos farmacéuticos es consistente con el Enfoque Estratégico de la UE para los Productos Farmacéuticos en el Medio Ambiente, y la inclusión de los dos antibióticos también es coherente con el Plan de acción europeo One Health contra la resistencia a los antimicrobianos (AMR), que respalda el uso de la lista de vigilancia para mejorar el conocimiento de la aparición y propagación de antimicrobianos en el ambiente.

Para los fármacos como el sulfametoxazol y la trimetoprima, los cuales la UE menciona que suelen ser usados en combinación debido a sus supuestos efectos sinérgicos; pueden y deben analizarse de manera conjunta, aunque no estén agrupados en la lista.

El 04 de agosto del 2020, se establece una lista de vigilancia de sustancias para el seguimiento a escala de la Unión en el ámbito de la política de aguas de conformidad con la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo la base de los datos de seguimiento obtenidos para las otras tres sustancias, a saber, la metaflumizona, la amoxicilina y el ciprofloxacino, desde 2018, la Comisión concluyó que no se habían obtenido suficientes datos de seguimiento de alta calidad y que, por lo tanto, esas sustancias deben permanecer bajo vigilancia.

Imagen 1. Sustancias prioritarias y contaminantes emergentes en aguas residuales.



Nota: Reproducido de Revisión del marco regulatorio de contaminantes emergentes [Imagen], por Centro del Agua para América Latina y el Caribe Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México, 2013. UNAM. ([http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03\\_salud/garcia\\_r\\_oeb.pdf](http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03_salud/garcia_r_oeb.pdf)).

A continuación, se enlista el marco regulatorio internacional conforme a Revisión del Marco Regulatorio de Contaminantes Emergentes en el Agua para México y el Mundo (2013)

Marco regulatorio internacional (European Commission)

- Resolución de cooperación internacional para disruptores endócrinos (2000).
- Resolución de cooperación internacional para orgánicos persistentes (2004).
- Restricciones al mercado:
  - REACH Regulation (1907/2006).
  - Plant Protection Products Regulation (1107/2009).
  - Biocidal Products Regulation (528/2012)

- Requerimientos de guías armonizadas para análisis de riesgos en alimentos (ECETOC,EFSA,2010)
- Reportes que indican la falta de técnicas cuantitativas y conocimiento en general:
  - 4to EC Staff Working Paper (2012)
  - OECD Weybridge + 15 (2012).
- Deadline para guías armonizadas: 9 de diciembre del 2013.

Marco regulatorio internacional (Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)

- El primer criterio para seleccionar sustancias peligrosas a regular en el agua son toxicidad, persistencia y bioacumulación.
- Existe una lista de 47 sustancias prioritarias y una clasificación de 6 contaminantes emergentes (retardantes de llama bromados, parafinas cloradas, pesticidas polares, perfluorados, fármacos y drogas) a regular.

Marco regulatorio internacional (United States Environmental Protection Agency)

- Clean Water Act (1977)
- Riesgo químico • Riesgo biológico
- Safe Drinking Water Act (1974) amendas en 1986 y 1996
- Revisión cada 5 años (Candidate Contaminant List) • Revisión de estándares cada 6 años
- Pharmaceutical manufacturing guidelines (1998)
- Uso veterinario (2007)

- Uso de antibióticos (2008)
- Nanomateriales Fact-Sheet (mayo 2012)
- Compuestos Fluorados- PFOS & PFOA (marzo 2013)

### 3.2 Legislación nacional

En 1976, estudios elaborados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos con el objetivo de una regulación oficial, se desarrolló en México los parámetros y valores característicos de contaminantes que se encuentran presentes en aguas. Dicha corporación perfiló contaminantes que era esperado encontrarse en las aguas residuales de industrias tanto alimenticias, textiles, curtiduría, química y acabado de metales. Con esto, se pudo notar la dificultad que existe para evaluar el grado de contaminación de aguas residuales de origen industrial y cuanta es la necesidad de decretar límites para el consumo de agua tanto de producto terminado como la materia prima transformada.

Es así como fueron reguladas las Normas Técnicas Ecológicas para el Control de la Calidad del Agua que se publicaron en el Diario Oficial de la Federación con fecha 4 de agosto de 1988, y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, que se emitieron el 13 de diciembre de 1989. Las Normas Técnicas Ecológicas establecían los límites máximos permisibles de los contaminantes específicos en las descargas de aguas residuales de 30 sectores industriales; fueron decretadas 25 de estas normas con propósito de reglamentar la calidad del agua residual vertida en cuerpos receptores, como el caso de los ríos, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua. Así mismo, la normatividad sugería los tipos de tratamiento que podrían aplicarse a las descargas para no rebasar los límites máximos permitidos.

Según el trabajo de Jacobo-Marín y Santacruz (2021), los límites máximos permisibles de contaminantes fueron fijados en parámetros esto de acuerdo con el promedio diario y el valor instantáneo. Este promedio diario se calcula mediante el análisis de muestras compuestas que resultan de la mezcla de muestras instantáneas tomadas a intervalos durante el proceso generador de la descarga.

Así mismo, señala que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología emitían las llamadas Normas Técnicas Ecológicas para establecer requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles del desarrollo de las actividades, uso y destino de bienes naturales los cuales era necesario vigilar debido al daño ambiental o desequilibrio ecológico que pudiera suceder. El 06 de junio de 1988 se realizó la publicación de las Normas Técnicas Ecológicas, tres meses después, entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Barrera-Bernal et al. (2020) señalan que el agua es un tema transversal, el cual abarca diferentes campos como el medio ambiente, la salud, el saneamiento, esto se refleja en la normatividad mexicana. Existen diversas normas que se aplican al agua, y algunas de las normas más relevantes se pueden agrupar por grupos: SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), Salud, Energía y Reglamento de México. Cabe recalcar que, de acuerdo con la Ley Federal de Metrología y Normalización, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son reglamentos técnicos de cumplimiento obligatorio, mientras que las Normas Mexicanas (NMX) son de aplicación voluntaria.

De este modo, en México la normatividad aplicable del agua para consumo se puede distinguir de acuerdo con la investigación de Barrera-Bernal et.al., de la siguiente manera:

Dentro de la Secretaría SEMARNAT se encuentra la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo en el año 2021 después de 25 años, SEMARNAT actualiza la NOM 001, la cual es aprobada por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Comarnat) el pasado 27 de agosto del 2021, siendo así, la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.

El comunicado emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021) informa que la NOM-001-SEMARNAT-2021 sería publicada en el Diario Oficial de la Federación en los días posteriores, no obstante, aún no se encuentra en la página oficial de la DOF. Se señalan las principales modificaciones de la NOM-001, las cuales se refieren a los parámetros de color verdadero, temperatura, demanda química de oxígeno y toxicidad. En lo que se refiere a temperatura, la NOM-001-SEMARNAT-2021 establece 35 grados como temperatura máxima para las descargas en ríos, bajando cinco grados al parámetro que existía en la NOM de 1996.

Y la NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual tiene como objetivo establecer los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades.

Continuando el orden, CONAGUA es la administración desconcentrada de SEMARNAT y tiene como objetivo administrar y proteger las aguas de la nación y sus bienes inherentes para su uso sostenible, La corresponsabilidad de los tres niveles de gobierno y la sociedad. Ha dictado reglamentos, especificaciones y métodos de prueba para

garantizar los productos y servicios relacionados con la industria del agua cumplen efectivamente, en la cantidad y la calidad.

La NOM-011-CONAGUA-2000 es una especificación a destacar porque se basa en la informática disponibilidad de agua en cuencas y acuíferos. Y finalmente: NOM-014-CONAGUA-2003 y la NOM-015-CONAGUA-2007 destinada a la infiltración artificial de agua a los acuíferos.

Finalmente, la Secretaría de Salud (SSA), mediante normas técnicas en las cuales se debe de cumplir el tratamiento de aguas para uso y consumo humano, así como establece normas higiénicas para su uso, manipulación y disposición aguas residuales. Incluye sanciones para quienes contaminen cualquier cuerpo de agua con la finalidad de evitar riesgos y daños a la salud pública. La SSA es la responsable de establecer requisitos higiénicos para el consumo humano, para ello la NOM define parámetros, en los cuales se incluyen propiedades físicas como profundidad y temperatura, biológicas como bacterias y parásitos y químicas; tipos orgánicos, inorgánicos por ejemplo las sales, metales, pesticidas y trihalometanos.

Se define que las Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

“son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes” (Secretaría de Salud, 2015).

Con respecto a lo anterior, en cuanto se refiere a los ECs no es posible enlistar NOM para este tipo de características, sin embargo, en el 2013 en el marco regulatorio nacional se hace referencia a 4 normas una de las incluidas la Norma Oficial Mexicana

NOM-001-ECOL-1996. De modo que continuando con la lista de normas aparecen las siguientes;

1. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Sin embargo, esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

2. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997 NOM-003-SEMARNAT-1997, que establecen los límites máximos permisibles de los contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

3. Norma Oficial Mexicana 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".

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

Por otra parte, la Secretaría de Economía mediante el Programa Nacional de Normalización en el año 2019 de la quinta sección en relación con la Sección de Normas Mexicanas en el apartado de Temas Adicionales a los estratégicos, I. Temas nuevos a ser iniciados y desarrollados como normas. Inciso A. Temas nuevos. Punto 6. Análisis de agua- Medición de Contaminantes Emergentes en aguas naturales, residuales y residuales tratadas Método de prueba. Tiene como objetivo y justificación: Contar con una Norma Mexicana para la medición de Contaminantes Emergentes, debido a que una mejor gestión de las aguas residuales implica no solo la reducción de la contaminación en las fuentes, sino también la eliminación de contaminantes de los flujos de aguas residuales, la reutilización de las aguas regeneradas y la recuperación de los subproductos útiles. Menciona que, en México, diferentes instituciones han trabajado en la medición de este tipo de contaminantes en diferentes matrices, pero no se cuenta con una norma mexicana para este tipo de análisis en agua, lo que ha impedido estandarizar las metodologías para esta medición, por lo que al contar con una norma se podrá medir y comparar los resultados obtenidos y de este modo tomar acciones que lleven a establecer límites máximos permisibles en los diferentes tipos de agua. La fecha estimada de inicio y terminación propuesta por la Secretaría es de enero de 2019 a diciembre de 2019.

## Capítulo 4. Principales afectaciones de los contaminantes emergentes

### 4.1 Afectaciones en la biota

La investigación de González (2016) menciona que la biota se puede definir como todos los organismos vivos en un área o tiempo determinado. Algunos de estos se pueden

utilizar para evaluar la calidad del medio ambiente y sus cambios a lo largo del tiempo. Este tipo de organismos se denominan biomarcadores, y su uso en la investigación ambiental (biomonitorización) es una estrategia ampliamente adoptada e incluso recomendada por directivas europeas. Son sensibles a las características físico-químicas de su entorno, su característica es que son capaces de acumular los contaminantes que es el proceso conocido como bioacumulación lo que permite llevar a cabo estudios ambientales de ecotoxicología y evaluación de riesgos. Esto logra una idea del grado de contaminación del compartimento ambiental en su hábitat.

Canchola et al. (2021) refieren que las plantas cuentan con la capacidad de absorber y bioacumular dentro de sus tejidos como son las hojas y las raíces a aquellos agentes contaminantes, esto es una vía de incorporación de los ECs dentro del ecosistema refiriéndose al agua y el suelo. Esto por otro parte tendría una parte positiva debido a que suelen ser usadas como biorremediadores, no obstante, la parte que podría resultar contraproducente es si las plantas contaminadas son consumidas por herbívoros y/o humanos.

La adsorción de los agentes contaminantes en los procesos físico-químicos involucrados, tanto los antibióticos u otros productos farmacéuticos llegan a tener gran afinidad por la absorción de las plantas, a su vez los antibióticos mayormente son los que tienden a ser absorbidos por el transporte apoplástico y así lograr acumularse en los espacios intracelulares, teniendo un impacto negativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Imagen 2. Ciclo de los ECs.



Nota: Reproducido de Canchola et. al. (2021, 15 mayo). Ciclo de los CE [Imagen].

Contaminantes emergentes: amenaza para la seguridad alimentaria en México.

<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/610/561>

Baz, señala que algunos de los factores como el pH, el tipo de suelo o agua en cuanto a los efectos ecológicos y la biodisponibilidad de los ECs generan cierta dificultad al momento de querer conocer los efectos negativos que causarán al medio, es decir, que las pruebas de laboratorio que se puedan realizar podría llegar a tener un resultado diferente a como se comportaría el contaminante en el medio ambiente.

Dentro de las principales fuentes de contaminantes emergentes están aquellas aguas residuales que no recibieron tratamiento alguno y los efluentes de plantas tratadoras de aguas las cuales su diseño no cuenta con la capacidad para tratar a este tipo de sustancias, teniendo como resultado que una alta proporción de dichos compuestos y sus metabolitos no sufren ningún cambio y es así como ingresan con una elevada toxicidad al medio acuático, como acuíferos y sistemas marinos entre otros (García et al., 2011).

Los ECs son de gran interés científico debido a que su emisión en el medio ambiente puede aumentar la presencia de bacterias resistentes y el riesgo que pueda representar para el consumo de agua potable debido a que las propiedades como alta solubilidad y poco biodegradable son capaces de llegar a un medio natural.

Teniendo en cuenta la persistencia de los ECs, se pueden llegar a producir procesos como bioacumulación, bioconcentración y biomagnificación de éstos en los diferentes organismos, menciona González.

Los ECs son potenciales a crear impactos en los diferentes niveles de la cadena alimenticia debido a que en la terminología de bioacumulación significa que es el almacenamiento y acumulación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos del medio ambiente por los organismos. Como ejemplo a este proceso, se menciona a los peces los cuales tienen la capacidad de bioacumular contaminantes ya sea a través de la incorporación de las sustancias que se encuentren presentes en el agua mediante sus branquias posterior a una exposición directa conocida como bioconcentración o por la ingesta de los alimentos que estén contaminados los cuales posteriormente son absorbidos por las mucosas intestinales, a este último proceso se le conoce como biomagnificación.

Baz, a partir de una recopilación de distintos autores detalla ejemplos de fármacos y sus efectos nocivos que fueron demostrados en organismos del medio.

- Antibióticos o Penicilina, sulfonamida y tetraciclinas causan resistencia a agentes bacterianos.
  - Toxicidad de ciprofloxacina a algas verdes.
  - Toxicidad del ácido oxolínico (aditivo para piensos, usado en piscifactorías) a *Daphnia magna* o Toxicidad de los antibióticos fluoroquinolonas en cianobacterias.

- Roxitromicina, claritromicina, tylosin: inhibición de crecimiento del alga *Pseudokirchneriella subcapitata*.
- Antiepilépticos (Carbamazepina) o Estrés oxidativo en la trucha arcoíris.
- Antiinflamatorios no esteroideos
  - Diclofenaco, lesiones renales y alteraciones branquiales de la trucha arcoíris.
  - Ibuprofeno, demostró una elevación de estradiol en plasma e inducción de vitelogenina (VTG) en peces machos a través del aumento de la actividad de la aromatasa y/u otras dianas moleculares.
  - Diclofenaco, puede afectar a la integridad de los riñones y agallas y parámetros inmunes en los peces.
- Antihipertensivos y reguladores de lípidos
  - Gemfibrozilo, inhibición del crecimiento del alga *Anabaena*.
  - Propranolol, reducción de la viabilidad de huevos de la especie *Oryzias latipes*.
- Antidepresivos/ ansiolíticos o Fluoxetina, altera la vía de señalización de la serotonina (5-HT).

Este neurotransmisor es un controlador fisiológico en organismos acuáticos y se ha demostrado que la presencia de este fármaco puede alterar la reproducción, el metabolismo y la locomoción de mejillones en concentraciones cercanas o incluso por debajo de las encontradas a nivel ambiental.

Oropesa et al. (2017), realizaron una revisión bibliográfica de lesiones histopatológicas en peces originadas por la exposición a contaminantes emergentes, que son compuestos de los cuales existe escasa información sobre el impacto en los distintos compartimentos ambientales motivo por el cual requiere de investigación.

De los grupos de fármacos que han sido detectados con mayor frecuencia en aguas superficiales se encuentran las hormonas y los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), seguido de los antibacterianos y antilipémicos. Las hormonas también han sido encontradas en sedimentos lo cual las vuelve un grupo mayoritario de ECs y su detección ha sido frecuente al igual que los antibacterianos, AINEs y analgésicos. Dentro de la clase terapéutica de los AINEs se han detectado en el medio acuático ibuprofeno, diclofenaco, naproxeno y ketoprofeno. El compuesto detectado con mayor concentración elevada ha sido el diclofenaco, 18.74  $\mu\text{g/L}$  en agua del río Llobregat, España, señalan.

Refiriéndose a los antibacterianos, se ha detectado con mayor frecuencia el medicamento sulfametoxazol, encontradas con una concentración máxima de 11.92  $\mu\text{g/L}$  en agua del río Llobregat, España y de 59 ng/g en sedimentos del río Haihe en China. Los analgésicos, por ejemplo, el paracetamol ha sido detectado a una máxima concentración de 10  $\mu\text{g/L}$  en el río Santa Cruz en Estados Unidos y a 29 ng/g en sedimentos del lago Michigan, USA.

En la Toxicología ambiental, los ECs son reconocidos como temas emergentes por su presencia, destino y comportamiento, afirma Oropesa et al. De igual modo, partiendo desde la problemática ambiental de estas sustancias resulta de algunas de sus características como su persistencia ambiental, esto a consecuencia de su resistencia a la degradación por métodos bióticos o abióticos, además de su continua introducción en el medio acuático a través de los efluentes de las ETARs esto debido a que no están implantados tratamientos ni físico-químicos o biológicos que actúen de manera eficaz para su degradación. Algunos ECs poseen log Kow (coeficiente de partición octanol-agua) elevados con lo cual pueden bioacumularse en los tejidos de los organismos acuáticos.

El origen de efectos tóxicos en organismos acuáticos se debe a que los ECs están constituidos por sustancias activas mediante las cuales poseen actividad biológica, la escasa información que se tiene en la literatura científica sobre estos efectos tóxicos los cuales se originan a partir de estas sustancias, en especial a sus efectos subletales los cuales es alta la probabilidad que sean originados por estar sometidos constantemente a bajas concentraciones de ECs y de forma continua. De las posibles alteraciones que podrían llegar a causar este tipo de compuestos son; alteraciones endocrinas, inmunes, metabólicas, histopatológicas, genéticas, alteraciones en los sistemas de defensa antioxidante, etc. Oropesa et al (Citado de Petrović et al., 2004; Abdelkader et al., 2012; Oropesa et al., 2013; Oropesa et al., 2014; Cuñat Zaira y Ruiz, 2016; Obimakinde et al., 2016; Oropesa et al., 2016; Oropesa et al., 2017).

Los peces representan uno de los elementos clave para evaluar el estado ecológico del medio acuático ya que son unos buenos bioindicadores de la contaminación de dicho compartimento ambiental (Hermoso et al., 2010). Estos organismos pueden absorber los tóxicos directamente del medio que les rodea o bien ingerirlos a través del alimento. En peces teleósteos las branquias reflejan las concentraciones de tóxicos presentes en el agua, mientras que el hígado y el riñón son tejidos metabólicamente activos y pueden acumular estas sustancias.

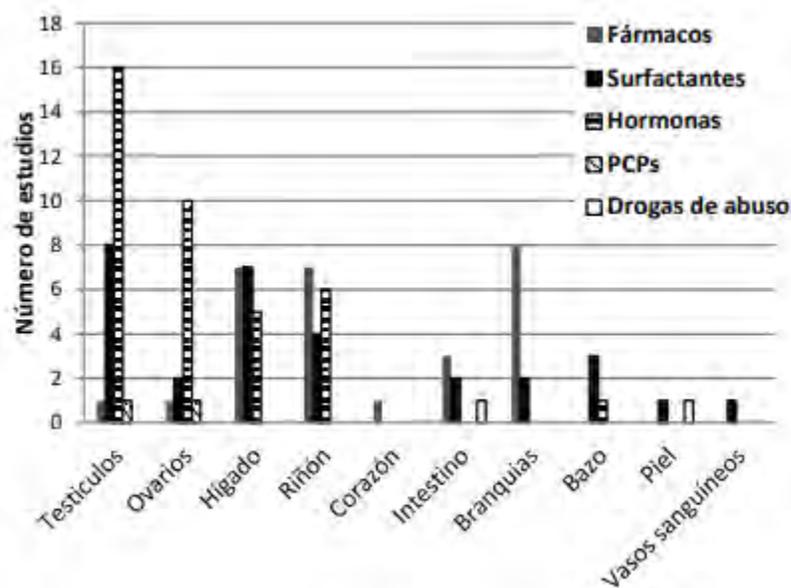
Oropesa et al., menciona que la Histopatología es una ciencia la cual está basada en el examen microscópico de las células y los tejidos de un organismo, así como en la determinación cualitativa y cuantitativa de lesiones histológicas. Por ello, los estudios histopatológicos de los diferentes órganos de vertebrados e invertebrados son útiles para caracterizar su estado de salud y también para investigar los efectos adversos de los

contaminantes ambientales sobre los mismos. Los cambios histopatológicos aparecen como una respuesta de medio plazo a factores estresantes subletales, como puede ser la exposición a tóxicos, y la Histología proporciona un método rápido para detectar los efectos de los contaminantes, especialmente los crónicos, en diversos tejidos y órganos.

Por todo lo indicado anteriormente, la Toxicología encuentra en la Histopatología una aliada ideal para caracterizar los procesos toxicológicos. De hecho, en la Estrategia Europea de Detección de Sustancias Activas Disruptoras Endocrinas se utiliza la Guía estandarizada (OECD nº 123, 2010) fundamentada en el examen histopatológico de las gónadas en peces como complemento a la evaluación de otros efectos originados por este tipo de sustancias. Algunos agentes disruptores endocrinos también son considerados ECs.

El surfactante nonilfenol, compuesto orgánico relacionado con la familia de los alquifenoles y el 17  $\alpha$ -etilindiestradiol, estrógeno derivado del estradiol el cual se utiliza como anticonceptivo y además como terapia de reemplazamiento estrogénico, llegan a ser ECs que han causado lesiones histopatológicas en órganos en los peces y así mismo son los que más se han estudiado, luego se encuentra el diclofenaco, fármaco perteneciente a la familia de los AINEs, como uno de los ECs más frecuentemente estudiados de acuerdo con distintas fuentes.

Imagen 3. Afección de órganos en peces por exposición a diferentes grupos de contaminantes emergentes.



Nota: Reproducido de Oropesa et al. (2017). Afección de órganos en peces por exposición a diferentes grupos de contaminantes emergentes [Imagen]. Lesiones histopatológicas en peces originadas por la exposición a contaminantes emergentes: recopilando y analizando datos (<https://www.redalyc.org/pdf/919/91954641004.pdf>).

Dentro de la recopilación de información que realizó Oropesa et al., afirma que la mayor afección de órganos en peces a diferentes grupos de contaminantes emergentes, en el grupo de los fármacos se observa una mayor afectación en hígado como consecuencia de la exposición a fármacos y hormonas. Esto debido a que el hígado es un órgano que recibe un gran aporte sanguíneo, lo que lleva a que, al ocurrir una alta exposición a tóxicos, interviene en la metabolización y detoxificación de las sustancias químicas y es así como las funciones suelen verse afectadas a consecuencia de las lesiones originadas tras la exposición a ECs.

Por otra parte, el artículo de García- Gómez et al., 2011 asegura que el diclofenaco afecta a los tejidos de las branquias y de riñones en peces de agua dulce, sugiriendo un posible riesgo para este tipo de poblaciones.

#### 4.2 Afectaciones a la salud humana

La incorporación de los ECs mediante el agua a los cultivos irrigados en concentraciones elevadas podría llegar a producir efectos negativos en la salud humana si llegará a ser consumida. Los ECs tienen la capacidad de crear efectos significativos tanto en los seres humanos como en especies animales aún en concentraciones bajas llegando al afectar sistema endocrino y bloqueando o perturbando las funciones hormonales, señaló García- Gómez et al.

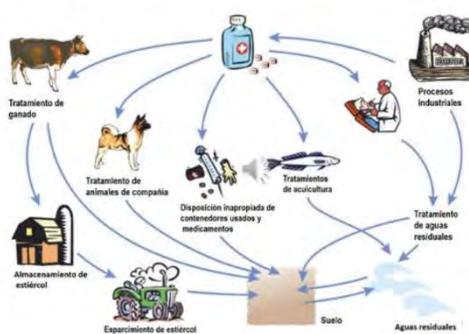
Ejemplificando, se tiene el caso del compuesto bisfenol A utilizado comúnmente para empaque de alimentos y agua, en cual se relaciona con tener efectos estrogénicos en ratas y por otra parte hormonales causando riesgo de cáncer de mama en humanos, al igual que causar efectos feminizadores en hombres según García- Gómez et al. De forma semejante, señala tener complicaciones en el embarazo a consecuencia de los ftalatos o ésteres de ftalato utilizados como plasticidas en plásticos como PVC. En el caso de los pesticidas como Dicloro-difenil-tricloroetano (DDT) ha sido logrado crear efectos hormonales provocando adelgazamiento en la cascara de huevo de diferentes especies y daños en la función reproductiva en el hombre, así como cambios de comportamiento en humanos.

Del mismo modo, Canchola et al., relaciona a los fármacos y productos de cuidado personal los cuales han sido detectados en entornos hidrológicos así como en tipos de suelo de todo el mundo, sin importar que sean concentraciones bajas (microgramos/L) que

pueden llegar a persistir en el medio ambiente durante meses o años y así lograr incorporarse en la cadena trófica logrando magnificarse inicialmente en depredadores, así mismo en la salud humana lograría tener repercusiones si se llega a tener una constante exposición.

La seguridad alimentaria tiene un papel importante en relación con la contaminación emergente, el medio de ingreso puede ser llevado a cabo a través de diferentes vías, uno de ellos puede ser mediante el riego de las hortalizas las cuales al ser regadas con aguas residuales existe la posibilidad de entrar en contacto con estos contaminantes, así como también hay riesgo de consumir alimentos y al mismo tiempo consumir fármacos o PCP en diminutas dosis de manera regular. Algunos países dentro de su regulación consideran las aguas residuales que son vertidas como uno de los principales medios de movilidad, siguiéndole la acuicultura y el uso de los biosólidos como fertilizantes y por consiguiente incorporarse a la cadena trófica mediante los alimentos como el consumo de hortalizas, leche y carne las cuales ya han sido contaminadas llegando a ser peligrosas contra la salud del grupo más susceptible como el caso de los niños y las embarazadas (Vera et al, 2002, como se citó en Cachola et al, 2021). Así mismo, señala que aquellos alimentos que han sido contaminados por los ECs no se verán afectados en las características organolépticas, lo que dificultará reconocerlas y poder llegar a incorporarse en la dieta diaria a través de la ingesta.

Imagen 4. Vías de exposición ambiental de los contaminantes emergentes



Nota: Reproducido de Cachola et al. (2021) Vías de exposición ambiental de contaminantes emergentes modificado de Boxall et al., 2012. [Imagen] contaminantes emergentes: amenaza para la seguridad alimentaria en México <http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/610>

De igual forma, una de las consideraciones a tomar en cuenta con relación al mecanismo de liberación y las posibles vías de exposición de los ECs que se aplicarían a un lugar, como primer punto es la ocurrencia y su permanencia con la que está en contacto en el medio ambiente, y así poder dar un tratamiento óptimo. Las técnicas de eliminación que en otros países sean considerados de importancia o que sea una sugerencia a aplicar, no significa que México puedan ser usadas, y esto partiendo del punto que se señala a los fármacos y a los productos de cuidado personal ni siquiera aún se cuenta con una legislación que regule dichos contaminantes por separado o la existencia de una lista de las sustancias prioritarias candidatas a monitoreo, Ramírez et al, así como Cachola et al., refiere al autor\_Muñoz (2012) quien propone una lista con 49 contaminantes de importancia potencial en México donde se incluyen hormonas y esteroides como el estradiol, fármacos como ibuprofeno y dexametasona, menciona también algunos antibióticos, y productos de cuidado personal, así como sustancias generadas a partir de procesos industriales como el Bisfenol A.

Canchola et al., continúa abordando que la seguridad alimentaria y su relación en cuanto a los ECs, son muchos los factores que ocasionan dificultad al momento de tratar de asegurar que los alimentos son de calidad y libres de sustancias que podrían llegar a ser tóxicas a la salud. Factores como la calidad del agua y suelo son fundamentales al momento

de abordar la seguridad alimentaria ya que son recursos para los cultivos así mismo, la escasez del agua ha provocado que aguas residuales sean usadas para riego.

## Capítulo 5. Presencia y tratamiento

### 5.1 Contaminantes emergentes presentes en aguas

Rivera señala que una de las fuentes directas tanto como indirecta de los ECs es la entrada al ciclo del agua debido a la influencia ambiental y de las actividades humanas lo que provoca que exista una alteración en la calidad de la misma. De igual manera refiere que de acuerdo con Petrović et al., 2003, de las principales vías mediante las cuales hay una entrada de contaminantes en el agua es a través de las aguas urbanas, industriales y las de origen agrícola o ganadero.

Al mismo tiempo Baz menciona que la fuente de contaminación es a través de las plantas depuradoras de aguas residuales principalmente las que son de origen industrial de los cuales muchos de sus compuestos no cuentan con una regulación lo que conlleva a que se viertan sin algún tratamiento previo en las aguas superficiales, posterior son las aguas de origen agrícola en la que destacan los fármacos de uso veterinario para la ganadería y los pesticidas que son usados en los cultivos, finalmente están las aguas que son de uso doméstico que pueden llegar a incluir contaminantes como productos farmacéuticos que son expulsados por medio de la orina o heces.

Por otro lado, los procesos que se utilizan para tratamiento de aguas residuales no eliminan los ECs y como se ha mencionado con anterioridad de acuerdo con otros autores, origina una descarga directa en las aguas superficiales receptoras, incluidos ríos, lagos y aguas costeras. Sin embargo, los procesos de lodos activados y filtros percoladores son de

los más utilizados por lo tanto los que más se estudian (Petrie et al., 2015). Así como también señala que se han informado aproximadamente 70 medicamentos de diferentes clases terapéuticas en el medio ambiente acuático del Reino Unido. Los más estudiados son los antiinflamatorios no esteroideos (AINE), los bloqueadores beta, los antidepresivos y los antiepilépticos de carbamazepina. Estas son regulaciones estrictas ( $>1000$  kg por año) y son comunes para las aguas residuales entrantes. El grado de remoción varía ampliamente de bajo ( $<50\%$ ) a alto ( $>80\%$ ) debido a las diferentes propiedades físicas y químicas y la susceptibilidad al ataque biológico. Petrie et al., señala que han sido encontradas sustancias en ríos como el alucinógeno 3,4-metilendioxi-N-metilanfetamina (MDMA) y la estimulante cocaína con concentraciones desde 25 y 17  $\text{ng l}^{-1}$  así como frecuentemente se ha encontrado en las aguas residuales a los antimicrobianos, a los agentes de protección solar y los conservantes que son productos químicos usados para el cuidado personal con valores de  $> 1000 \text{ ng l}^{-1}$ .

Gogoi et al., clasifica a tres grupos de ECs con ocurrencia y destino de los contaminantes emergentes en el medio acuático;

1. Productos farmacéuticos (PhAC). Los PhAC son un conjunto de contaminantes ecológicos en desarrollo que son en general utilizados progresivamente como parte de la medicación humana y veterinaria de los que incluyen compuestos de preocupación ambiental como antibióticos, drogas legales e ilícitas, analgésicos, esteroides, betabloqueantes, etc. y, su persistencia en el cuerpo ocurre debido a su modo de acción específico. Han sido detectados en efluentes de tratamientos de aguas residuales, en lodos, sedimentos, aguas naturales, agua potable y agua subterránea.

2. Productos de cuidado personal (PCP). Algunos PCP por nombrar son productos cosméticos, hormonas modificadas, esteroides, perfumes, champús, etc. Los filtros UV, se sabe que tienen actividad estrogénica, y es uno de los más comúnmente encontrados del tipo de PCP en aguas subterráneas y otros medios acuáticos.

Disruptores endocrinos (EDCS). Los EDC se caracterizan como sustancias químicas artificiales que, cuando se ingieren en el cuerpo pueden copiar u obstruir las hormonas y afectar el funcionamiento normal del cuerpo. Los EDC naturales y artificiales son vertidos en el medio ambiente por las actividades humanas e industriales, principalmente a través de sistemas de tratamiento de aguas residuales antes de finalmente terminar en el suelo y consecutivamente en aguas superficiales y aguas subterráneas.

De manera similar los contaminantes emergentes que entran al ambiente a través de algunas fuentes y vías (Gil et al., 2012);

1. Primer grupo: pesticidas o plaguicidas

Los plaguicidas son sustancias o mezclas de sustancias destinadas a prevenir, destruir, repeler o reducir plagas. Debido a la normativa a la que están sujetos, han sido estudiados durante décadas y por tanto se tiene un conocimiento razonable de su existencia y destino en el medio acuático. Los estudios han demostrado que los metabolitos de pesticidas generalmente se detectan en las aguas subterráneas en concentraciones más altas que los compuestos originales.

En un estudio realizado por el Reino Unido, se reportaron concentraciones de metabolitos de plaguicidas medidos en las aguas subterráneas.

## 2. Segundo grupo: productos farmacéuticos

La existencia de los productos farmacéuticos que se han encontrado en el medio acuático genera preocupación, de acuerdo con Gil et al., los fármacos más usados mundialmente son analgésicos, antihipertensivos y antimicrobianos.

De estos grupos de farmacéuticos el mayor consumo mundial y que se considera como los de mayor automedicación en la población el diclofenaco con reportes de presencia en aguas residuales, el naproxeno, el ibuprofeno y el acetaminofén se reportaron en aguas residuales hospitalarias. Así como de igual manera los metabolitos del ibuprofeno han sido encontrados a lo que Gil et al añade que es de gran importancia conocer las rutas metabólicas de cada uno de los compuestos, para poder determinar o descartar el origen de su toxicidad. Dentro de los antihipertensivos (de uso frecuente por la hipertensión arterial) destacan el calcio-antagonista, los inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina y los beta-bloqueadores, entre otros.

Se han encontrado valores superiores a los  $0.017\mu\text{g/L}$  en efluentes de aguas municipales  $\beta$ -bloqueadores como el atenolol, el metoprolol y el propranolol.

De los fármacos de amplio uso en el mundo están los antibióticos lo cuales son usados para contrarrestar a los microorganismos y preservar alimentos lo que ha generado que su producción aumente. Debido a lo anterior, se señala que en las descargas de los cuerpos de agua exista una resistencia microbiana. Existe evidencia de la presencia de residuos de antibióticos dentro del ambiente.

### 3. Tercer grupo: las drogas ilícitas

Desde el siglo XX fueron confirmadas la presencia de las drogas ilícitas en el medio ambiente, la ruta principal para la contaminación de las aguas son las descargas de aguas residuales municipales que no fueron previamente tratadas (Pacheco 2019).

Gil et al., menciona que los contaminantes de drogas ilícitas que más se han estudiado es la anfetamina, seguido por la cocaína, así como sus metabolitos benzoilecgonina, norcocaína; metanfetamina, heroína, (3,4 metilendioximetanfetamina) MDMA y la morfina.

### 4. Cuarto grupo: hormonas esteroides

Este tipo de grupo es producido en células específicas de los testículos, la corteza adrenal, ovarios y placenta. El hombre secreta la testosterona (andrógenos) la corteza adrenal produce la aldosterona, cortisol y la DHEA (dehidroepiandrosterona), los ovarios producen los estrógenos que engloban el estradiol, 4-androsteno-3, 17-diona y la progesterona, y por último estaría la placenta que también secreta estradiol y progesterona, pero además produce otra sustancia, el estriol. De modo que, según Gil et al., los estrógenos como los andrógenos son introducidos al ambiente a través de los efluentes de aguas residuales después de pasar por las plantas de tratamiento sin ser eliminados y es como así actúan a como disruptores endocrinos. Los compuestos sintéticos como el caso de la oxandrolona y nandrolona, se investigan más por su ocurrencia en las aguas superficiales y subterráneas.

#### 5. Quinto grupo: cuidado personal

Los productos de cuidado personal (PCP) refieren a un amplio grupo de compuestos químicos en los que se incluyen variados productos que son usados en el día a día. Estos se encuentran presentes en productos como pastas de dientes, champús, cosméticos y detergentes, así como también uso son utilizados para la producción de plásticos, la industria textil y la industria alimentaria entre otras (Molins, 2017).

Gil et al señala que este tipo de productos de cuidado personal pueden diferenciarse de los farmacéuticos debido a que en grandes cantidades pueden ser directamente introducidos al ambiente; un ejemplo mencionado es que o son liberados dentro de las aguas recreacionales o bien son volatilizados en el aire.

#### 6. Sexto grupo: surfactantes

Pachés 2020, señala que los surfactantes son utilizados en el sector industrial con distintos motivos de fabricación como por ejemplo celulosa, pasta de papel, cemento, metalurgia, agricultura, textil, curtido, pinturas, lacas, detergentes, plásticos, gomas, barnices, y también en industria alimentaria. Dichos compuestos actúan como espumantes, dispersantes, emulsionantes, detergentes, solubilizantes, humectantes, plastificantes y espesantes.

Por otro lado, afirma que la vía de ingreso al medio ambiente de estos contaminantes es a través de las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde solamente son degradados parcialmente. Y señala que existen estudios que han

evaluado la concentración de este tipo de productos tanto en ríos, lagos y aguas costeras.

Rivera menciona que durante varios años se han estado estudiado y se ha logrado determinar e identificar que ciertos grupos de contaminantes emergentes están presentes en las aguas residuales y crudas con niveles de concentración de  $\mu\text{g/L}$  hasta  $\text{ng/L}$  y que una de sus características es su alta persistencia y la baja degradación dentro del medio ambiente. Entre los efectos de sus metabolitos se encuentran los toxicológicos a organismos acuáticos y microorganismos. Los productos farmacéuticos son los más estudiados dentro de los contaminantes emergentes debido a la creciente preocupación por el continuo uso en la medicina humana y veterinaria.

## 5.2 Fármacos encontrados en aguas

Actualmente en cuanto a un importante elemento de sanidad a escala mundial se encuentra la industria farmacéutica quien se encarga de la manufacturación de medicamentos y de la limpieza de los equipos lo que origina aguas residuales con la presencia de este tipo de contaminantes emergentes los cuales son de difícil eliminación con tratamientos tradicionales en las PTAR lo que ha generado impactos ambientales sobre los ecosistemas (Jaime y Vera, 2020).

De manera similar, los residuos de varios tipos de contaminantes terminan en las aguas residuales municipales, la presencia de residuos de medicamentos, pesticidas y otras sustancias de ECs son vertidos en el agua y no son regulados. De igual forma, continuamente en pequeñas cantidades son liberadas al medio ambiente lo que con el

tiempo va generando una acumulación en el entorno. Jaime y Vera refieren que si bien estos productos químicos no son nuevos si han estado presentes en el medio ambiente generando importancia debido a su toxicidad motivo por el cual están siendo evaluados.

De todos los contaminantes emergentes, los medicamentos son quizás el más preocupante, por lo que su investigación es una de las áreas de investigación prioritarias de las organizaciones. La principal organización dedicada a proteger la salud pública y el medio ambiente es la INFAC. La presencia de antibióticos y desinfectantes en los vertimientos de las industrias, afectan la efectividad del tratamiento biológico del agua residual, mencionan Jaime y Vera.

Diversas investigaciones por profesionales han reportado la presencia de medicamentos presentes en el medio ambiente y se ha estimado que en aproximadamente el 50% de las aguas residuales de las industrias farmacéuticas son vertidas sin un tratamiento previo específico para tal fin generando residuos farmacéuticos. En el año de 1970 fue reportado por primera vez que las aguas residuales contenían fármacos cardiovasculares, analgésicos y anticonceptivos en Estados Unidos.

Rodríguez (2013) señala que al menos unos 150 medicamentos han sido detectados por científicos en los últimos años en lugares tan remotos como el Ártico y considera que este tipo de contaminación empeorará a medida que la necesidad por mundial por medicamentos también lo haga.

La presencia de los fármacos en el medio ambiente puede estar en función de: a) la cantidad manufacturada de estas sustancias, b) la cantidad ingerida y frecuencia de la dosis; c) el índice de excreción del compuesto original y sus metabolitos; d) la propensión de

estos fármacos a adsorberse en los sólidos suspendidos del agua residual y e) las transformaciones metabólicas sufridas en los sistemas de tratamiento del agua residual (Durán, 2009). La forma en que las sustancias farmacéuticas activas logran llegar al ambiente es a través de varias rutas como se muestra en la tabla 2 (Duran, 2018) a través de la cantidad consumida por animales y seres humanos, por la inadecuada disposición de los fármacos caducos, por lo efluentes de aguas residuales en los procesos manufactureros y los derrames accidentales.

Por otro lado, se hace referencia a un caso ocurrido en la Ciudad de México por otros autores quienes realizaron estimaciones a las concentraciones de los fármacos que eran inducidas al Valle de Tula mediante las aguas residuales de la zona, llegando a estimar un consumo de 4 gramos per cápita al año de fármacos en la Ciudad de México. Se calcularon las concentraciones de 11 fármacos, antibióticos y antiinflamatorios los cuales eran inducidos al medio ambiente a través del agua residual con valores de 1 µg/L, valor el cuál es el límite para el requerimiento a una evaluación de riesgos ambientales en Estados Unidos.

Tabla 2

Presencia de fármacos en el ambiente reportada por varios autores (Duran, 2009)

<b>Compuesto</b>	<b>Matriz</b>	<b>Concentración</b>
<b>Carbamazepina</b>	Suelo regado con agua	<sup>a</sup> 0.9 ng/g
<b>Eritromicina</b>	residual	<sup>a</sup> 1.05 ng/g

<b>Trimetropim</b>		<sup>l</sup> 200 ng/g
<b>Carbamazepina</b>	Escorrentía de campos	<sup>h</sup> 320-440 ng/g
<b>Ibuprofeno</b>	agrícolas regados con agua residual	<sup>b</sup> <1300 ng/g
<b>Ibuprofeno</b>	Sedimentos	<sup>e</sup> <LLD
<b>Naproxeno</b>		<sup>e</sup> 60 ng/g
<b>Carbamazepina</b>	Agua residual	<sup>g</sup> 291 ng/g
<b>Ibuprofeno</b>		<sup>g</sup> 350 ng/g
<b>Naproxeno</b>		<sup>e</sup> 500 ng/g
<b>Diclofenaco</b>		<sup>b</sup> 2000 ng/g
<b>Trimetropim</b>		<sup>l</sup> 660 ng/g
<b>Eritromicina</b>	Agua residual tratada	<sup>k</sup> 886 ng/L
<b>Carbamazepina</b>	Agua superficial	<sup>e</sup> 40 ng/L
<b>Ibuprofeno</b>		<sup>l</sup> <LDD
<b>Naproxeno</b>		<sup>l</sup> 226 ng/L
<b>Diclofenaco</b>		<sup>e</sup> 10 ng/L

<b>Eritromicina</b>		<sup>l</sup> 700 ng/L
<b>Trimetropim</b>		<sup>l</sup> 200 ng/L
<b>Naproxeno</b>	Agua subterránea	<sup>e</sup> 40 ng/L
<b>Diclofenaco</b>		<sup>i</sup> n.d.
<b>Eritromicina</b>		<sup>i</sup> 530 ng/L
<b>Carbamazepina</b>	Agua subterránea	<sup>j</sup> 530 ng/L
<b>Diclofenaco</b>	reinyectada	<sup>f</sup> 195 ng/L

<sup>a</sup>Kinney et al.,2006; <sup>b</sup>Ternes et al.,2007; <sup>c</sup>Tixier et al.,2003; <sup>d</sup>Gibson et al.,2007; <sup>e</sup>Antonic et al.,2007; <sup>f</sup>Ashton et al.,2004; <sup>g</sup>Stumpf et al.,1999; <sup>h</sup>Pedersen et al.,2005; <sup>i</sup>Zuccato et al.,2005; <sup>j</sup>Kreuziger et al.,2004; <sup>k</sup>Nakata et al.,2005; <sup>l</sup>Hirsch et al.,2000; n.d. : no detectado; <LLD:debajo del límite de detección.

Nota: De “Cuantificación de doce contaminantes emergentes, provenientes de agua residual empleada para riego, en suelos del Distrito de Riego 03 Tula, Hidalgo,” por J. Duran, 2009, Repositorio Institucional UNAM.

Rivera refiere dentro de las investigaciones de diferentes autores que, de los fármacos encontrados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), la cual se reportó que en Europa se halló la presencia de 118 dentro de los cuales 17 pertenecían a diferentes clases terapéuticas del influente y efluente de 244 plantas de tratamiento de aguas residuales a lo largo de toda Europa. A esto, también se menciona que los rangos de

concentraciones de los fármacos variaban siendo más altos en el influente que en el efluente, donde dentro del grupo terapéutico en el influente destacaron los analgésicos y anti-inflamatorios contrarios al efluente donde ahí fueron detectados niveles por debajo para los reguladores de lípidos y los beta-bloqueadores. Por otro lado, fueron analizados a nivel mundial los datos reportados sobre la presencia de 203 fármacos en los efluentes de las plantas de tratamiento y en el agua superficial de 41 países, se llegó a encontrar que la carbamazepina, el bezafibrato, el ácido clofibrico, el ibuprofeno y el diclofenaco fueron los fármacos detectados con mayor frecuencia en el efluente y agua superficial.

Así mismo diferentes investigaciones en Costa Rica arrojan el resultado del análisis de 34 productos farmacéuticos y de cuidado personal en 86 muestras individuales de agua recolectadas de aguas superficiales y costeras donde se incluyó las áreas donde se sufrió impacto a las aguas residuales ya tratadas como las no tratadas y escorrentía superficial.

Meffe y de Bustamante (2014) señalan que se han publicado 15 estudios que investigan en relación con la presencia de 67 productos farmacéuticos en aguas superficiales y subterráneas entre 2000 y 2013, los estudios que informan las concentraciones farmacéuticas en las aguas subterráneas se limitan a la región de Piamonte y Lombardía en el norte de Italia y Apulia en el sur de Italia. De los compuestos informados pertenecen a las siguientes categorías: antibióticos, antiinflamatorios, reguladores de lípidos,  $\beta$ -bloqueadores, ansiolíticos y anticonvulsivos, cicatrizantes de úlceras, diuréticos, medicamentos contra el cáncer, analgésicos, antihipertensivos, antidiabéticos, broncodilatadores y repelentes de mosquitos.

Por otro lado, dentro de la ocurrencia reportada por Meffe y de Bustamante, de 66 productos farmacéuticos reportados para aguas superficiales, 13 compuestos, en su mayoría

antibióticos de sulfonamida, nunca fueron detectados. Algunos compuestos como son la azitromicina, trimetoprima, indometacina, metoprolol, lorazepam y glibenclamida, se estimaron sus datos mediante la interpretación de gráficos de Al Aukidy et al. En las concentraciones más altas en aguas superficiales detectaron; para paracetamol ( $3,59 \times 10^3$  ng L<sup>-1</sup>), furosemida (605 ng L<sup>-1</sup>), sotalol (504 ng L<sup>-1</sup>), carbamazepina (345 ng L<sup>-1</sup>), ofloxacino (306,1 ng L<sup>-1</sup>), naproxeno (264 ng L<sup>-1</sup>), hidroclorotiazida (255,8 ng L<sup>-1</sup>), lincomicina (248,9 ng L<sup>-1</sup>), atenolol (241,9 ng L<sup>-1</sup>), sulfadiazina (236 ng L<sup>-1</sup>), ibuprofeno (210 ng L<sup>-1</sup>), ácido salicílico (205 ng L<sup>-1</sup>) y bezafibrato (202,7 ng L<sup>-1</sup>).

Ahora bien, existe la presencia de los productos farmacéuticos en aguas superficiales y residuales de México como se presenta en la Tabla 3 (Rivera, 2018). Otro autor estudió la movilidad de los fármacos a través de diferentes puntos del sistema de riego de las aguas residuales del Valle de Mezquital en la ciudad de México. Se obtuvo como resultado que las especies aniónicas de sustancias de los fármacos activas pueden moverse en el suelo que sea de característica arcillosa de dicho valle y encontrando que la eliminación durante el almacenamiento a comparación de compuestos catiónicos o neutros si logran ser retenidos. Por otro lado, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), investigó la presencia de 15 fármacos en aguas del río Yautepec y Cuautla y en el efluente de una PTAR de Yautepec ubicada en Morelos. En el efluente de la PTAR fármacos como atenolol (6.75-9.10 ng/ mL), sulfametoxazol (87-136 ng/mL), propranolol (2.85- 6.25 ng/mL), naproxeno (1.45-1.86 ng/mL) se detectaron.

Tabla 3.

Productos farmacéuticos detectados en aguas superficiales y residuales de México (Rivera, 2018)

<b>Compuesto</b>	<b>Matriz</b>	<b>Concentración min-max (ng/L)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Ácido salicílico</b>	Agua residual	* <sup>c</sup> 29867; ** <sup>d</sup> 72979	<sup>c</sup> Castro, 2008 <sup>d</sup> Chávez et al., 2011 <sup>e</sup> Félix-Cañedo et al., 2013
	Agua superficial	<sup>e</sup> 29-309	
<b>Bezafibrato</b>	Agua residual	<sup>b</sup> 30-650	<sup>b</sup> Siemens et al., 2008
<b>Diclofenaco</b>	Agua residual	<sup>a</sup> 1720-6360; <sup>b</sup> 2500-5000; <sup>*c</sup> 1607; <sup>**d</sup> 3768	<sup>a</sup> Gibson et al., 2007 <sup>b</sup> Siemens et al., 2008 <sup>c</sup> Castro, 2008 <sup>d</sup> Chávez et al., 2011
	Agua superficial	28-32	Félix-Cañedo et al., 2013
<b>Gemfibrozil</b>	Agua residual	<sup>a</sup> 640-680; <sup>*b</sup> 20; <sup>*c</sup> 680	<sup>a</sup> Gibson et al., 2007 <sup>b</sup> Siemens et al., 2008 <sup>c</sup> Castro, 2008
	Agua superficial	9-10	Félix-Cañedo et al., 2013
<b>Ibuprofeno</b>	Agua residual	<sup>a</sup> 4380-5090; <sup>b</sup> 2200-3800; <sup>**c</sup> 2500; <sup>**d</sup> 4700	<sup>a</sup> Gibson et al., 2007 <sup>b</sup> Siemens et al., 2008 <sup>c</sup> Castro, 2008 <sup>d</sup> Chávez et al., 2011
	Agua superficial	15-45	Félix-Cañedo et al., 2013
<b>Naproxeno</b>	Agua residual	<sup>a</sup> 15220-16650; <sup>b</sup> 4800-5600; <sup>*c</sup> 13620; <sup>**d</sup> 16336	<sup>a</sup> Gibson et al., 2007 <sup>b</sup> Siemens et al., 2008 <sup>c</sup> Castro, 2008 <sup>d</sup> Chávez et al., 2011

---

Agua superficial 52-186

Félix-Cañedo et al., 2013

---

\*Concentración promedio; \*\*concentración máxima.

Nota: De “Investigación y evaluación de contaminantes emergentes (productos farmacéuticos) presentes en la cuenca del Río Apatlaco en el Estado de Morelos,” por Mica Rivera, 2018, Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/430>

### 5.3 Eliminación de los contaminantes emergentes

Tratamientos fisicoquímicos como lo son la coagulación, flotación y cloración fueron usados para la eliminación de contaminantes emergentes, sin embargo, un estudio reveló que al utilizar tratamientos como coagulación/flotación, suavización con cal, ozonización, cloración y adsorción con carbón activado granular (CAG) en 30 diferentes compuestos no hubo una remoción significativa (García et al., 2011). Así mismo, no se logró la remoción de compuestos farmacéuticos como carbadox, sulfadimetoxina, trimetoprim con la utilización de coagulantes, el método de coagulación tampoco tuvo resultados significantes ya que no logró la eliminación de de diclofenaco, carba, azepina, ibuprofeno y ketoprofeno.

Por otro lado, la eliminación de ibuprofeno y diclofenaco mediante procesos de oxidación avanzados (POA) como ozono con peróxido de hidrogeno (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) se obtuvo un 90% de eliminación.

El uso de microalgas para tratamiento de compuestos orgánicos aumentó, el porcentaje de remoción por *C. sorokiniana* en ácido salicílico obtuvo un resultado de

remoción mayor a 93% en medio Mann y Miers, con agua sintética; y por Nannochlorissp; y con un resultado de remoción del 100% para ciprofloxacina en medio F/2 (Sandoval et al., 2020).

Jaime y Vera señalan que mediante la técnica de la ozonización se eliminan residuos de medicamentos presentes en aguas residuales, algunos fármacos son; el ibuprofeno, diclofenaco y propofol, entre otros. El ozono es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante. Por otro lado, diversos autores recomiendan el proceso de ozonización debido a la capacidad de degradar compuestos orgánicos tóxicos aumentando así la biodegradabilidad del efluente, ya que el ozono es un oxidante eficaz, así mismo también es capaz de reducir las concentraciones de muchos productos farmacéuticos.

A continuación, en la tabla 4 se muestra una recopilación de diversos autores que han investigado y utilizado diferentes procesos para la eliminación de los ECs.

Tabla 4

Diferentes estudios sobre eliminación de contaminantes emergentes en aguas.

<b>Artículo/Tesis</b>	<b>Autor y año</b>
<b>Eliminación de contaminantes emergentes en aguas residuales mediante oxidación avanzada con ozono y ultrasonidos</b>	Abellán S. M., Lardín M. C., Morales C., E., Pastor A. L., Martínez M. J., Santos A. J., Ibáñez, M. y Hernández F. (2013)
<b>Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes</b>	Rubio C. A., Chica A. E., Peñuela M. G. (2013)

---

**Eliminación de contaminantes emergentes** Álvarez T. S. (2014)  
**presentes en aguas mediante adsorción en**  
**lecho fijo**

---

**Fármacos como contaminantes** Pérez A. J. (2017)  
**emergentes: Caracterización,**  
**cuantificación y eliminación en plantas de**  
**tratamiento de aguas residuales**

---

**Evaluación y tratamiento de** Cruz C. M. (2019)  
**contaminantes emergentes (fármacos**  
**ácidos) en aguas residuales mediante un**  
**reactor SBRLF acoplado a fotocátalisis**

---

**Utilización de películas nanotubulares de** Martínez F. K. (2021)  
**TiO<sub>2</sub>, para la foto-degradación de**  
**contaminantes emergentes (fármacos) en**  
**el agua.**

---

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Durante los últimos años ha ido en aumento la preocupación en relación con los ECs, los cuales provienen de distintas fuentes de origen y derivados de otros productos. Es por ello, que cada vez se realizan investigaciones abarcando de manera más extensa este tipo de contaminantes los cuales al día de hoy continúan de manera constante en el medio ambiente y aún se desconoce de manera exacta los posibles efectos negativos tanto al medio ambiente como a la salud humana. Si bien en diferentes países se ha comenzado a regular estos contaminantes o a crear listas de sustancias prioritarias con el objetivo de llevar un control sobre las mismas, aún queda demasiado vacío en la legislación.

Los productos farmacéuticos han sido un gran aporte a través de los años para las necesidades en humanos como en animales, sin embargo, como fue investigado por diferentes autores en diferentes lugares del mundo, los desechos provenientes de los fármacos han logrado ingresar al medio ambiente por diferentes vías, haciendo que cada vez que encuentren concentraciones más altas en suelo y aguas. Se ha demostrado que estos productos llegar a ser tóxicos logrando afectar a toda una jerarquía biológica. Por otro lado, aún no se cuenta con suficientes investigaciones que demuestren cuáles serán las afectaciones a la salud humana.

En México se han encontrado diversos grupos de fármacos en aguas superficiales y subterráneas, y las limitantes en el marco regulatorio del país dificulta medir su incidencia e influencia en el ecosistema. No obstante, no es el único problema con el que se cuenta en relación a este grupo de contaminantes, las plantas de tratamiento no están diseñadas para la eliminación de los mismos lo que ha llevado a que exista la presencia de los

contaminantes emergentes en el proceso de salida de las plantas. Aunque en países se esté trabajando con diversas investigaciones tratando de desarrollar diversas técnicas para el proceso de tratamiento de los CEs, son muchos los compuestos que cubrir por lo que es una ventana abierta a continuar investigando junto a la investigación toxicológica.

## Referencias

1. Baz L. (2019). Contaminantes emergentes. Impacto sobre la salud y el medio ambiente. [Dataset]. Versión de 28 de mayo de 2019. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/LAURA%20BAZ%20SANZ.pdf>
2. Barrera-Bernal, C., Domínguez-Barrera, C., y Guzmán-Guillermo, J. (2020) Capítulo 5 Agua y salud en México: patógenos y legislación. Handbooks-ECORFAN-México. <http://doi.org/10.35429/H.2020.9.62.76>
3. Canchola, M., Romero Hernández, M., Rueda Luna, R., Flores Sotelo, M. T., Zayas Pérez, M. T., Castañeda Roldan, E. I., Herrera Cárdenas, J. A., y Tenorio Arvide, M. G. (2021). Contaminantes emergentes: amenaza para la seguridad alimentaria en México. RD-ICUAP, 7(20), 220-232. <http://rd.buap.mx/ojsdm/index.php/rdicuap/article/view/610>
4. Commission Implementing Decision (EU) 2020/1161 of 4 August 2020 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document number C (2020) 5205) (Text with EEA relevance) <https://eur-lex.europa.eu/legal-ontent/en/TXT/?uri=CELEX%3A32020D1161>
5. CONAGUA (2015). Contaminantes emergentes. MYDOKUMENT. <https://mydokument.com/contaminantes-emergentes-diciembre-2015.html>
6. Cuenca, M. (2019, 17 de septiembre). Contaminantes emergentes: origen y destino. Biblioteca Digital Universidad de Alcalá. [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41744/TFM\\_Cuenca\\_Rompinel\\_i\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41744/TFM_Cuenca_Rompinel_i_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

7. Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj>
8. Duran, A. J. (2009). Cuantificación de doce contaminantes emergentes, provenientes del agua residual empleada para riego, en suelos del distrito de riego 03, “Tula” Hidalgo [tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM.
9. García-Arazola, R. (2013, diciembre 09). Revisión del marco regulatorio de contaminantes emergentes. UNAM. [http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03\\_salud/garcia\\_roeb.pdf](http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03_salud/garcia_roeb.pdf)
10. García-Gómez, C., Gortáres-Moroyoqui, P., y Drogui, P. (2011). Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Química Viva*, 10(2), 96-105.
11. Gil, M., Soto, A., Usma, J., y Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7 (2), 52-73.
12. Gogoi, A., Mazumder, P., Tyagi, V. K., Tushara Chaminda, G. G., An, A. K., y Kumar, M. (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.009>

13. González R. A. (2016). Caracterización y seguimiento de contaminantes emergentes [tesis doctoral, Universidad de Valencia]. Repositori de Contingut Lliure <https://roderic.uv.es/handle/10550/53347>
14. Henríquez, V. D. (2012) Presencia de Contaminantes Emergentes en Aguas y su Impacto en el Ecosistema. Estudio de Caso: Productos Farmacéuticos en la Cuenca del Rio Biobío, Región del Biobío, Chile. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102748>
15. Jacobo-Marín, D., y Santacruz de León, G. (2021). Contaminantes emergentes en el agua: Regulación en México, principio precautorio y perspectiva comparada. Revista de Derecho Ambiental, 1(15), pp. 51-75. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2021.57414>
16. Jaime-Urbina, J. y Vera-Solano, J. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. Informador Técnico, 84(2), 249-263. <https://doi.org/10.23850/22565035.2305>
17. Meffe, R., y de Bustamante, I. (2014). Emerging organic contaminants in surface water and groundwater: A first overview of the situation in Italy. Science of The Total Environment, 481, 280–295. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.053>
18. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, del 22 de noviembre del 2000, que establece Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000)

19. Molins, D. D. (2017) Productos de Cuidado Personal en el Medio Ambiente: Presencia, destino y efectos [tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelonatech]. Repositorio Institucional TDX. <http://hdl.handle.net/10803/461951>
20. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, del 09 de enero de 1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4864139&fecha=09/01/1997](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4864139&fecha=09/01/1997)
21. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, del 21 de septiembre, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>
22. Oropesa, A., Moreno, J. y Gómez J. (2017). Lesiones histopatológicas en peces originadas por la exposición a contaminantes emergentes: recopilando y analizando datos. Revista Toxicológica, 34 (2), 99- 108.
23. Pacheco, A. (2019). Estimaciones del consumo de drogas ilícitas derivadas del análisis de aguas residuales: Una revisión crítica. Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud, 51(1), 69 80. <https://doi.org/10.18273/revsal.v51n1-2019008>
24. Petrie B., Barden R. y Kasprzyk-Hordern B. (2015) A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring, Water Research, 72,3-27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>

25. Ramírez-Sánchez, I. M., Martínez-Austria, P., Quiroz-Alfaro, M. A., y Bandala, E. R. (2015). Efectos de los estrógenos como contaminantes emergentes en la salud y el ambiente. *Tecnología y Ciencias del Agua*. [Dataset] versión de 05 de mayo de 2015 <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n5/v6n5a3.pdf>
26. Revisión del marco regulatorio de contaminantes emergentes. (2013). Marco Regulatorio Internacional [Imagen]. UNAM. [http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03\\_salud/garcia\\_roeb.pdf](http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/03_salud/garcia_roeb.pdf)
27. Rivera M.J. (2018). Investigación y evaluación de contaminantes emergentes (productos farmacéuticos) presentes en la cuenca del río Apatlaco en el Estado de Morelos [tesis doctoral, Universidad Autónoma de Estado de Morelos]. Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/430>
28. Rodríguez, P. R. (2013). Influencia de los fármacos presentes en el agua residual sobre la resistencia de la bacteria *Escherichia coli* y su eliminación por oxidación avanzada [tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, España]. Repositorio Institucional UPM.
29. Sánchez Leadina (2015). Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias. [Dataset] Versión de 28 de mayo del 2015 <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/43541/51442>
30. Sandoval, J. A., Morales-Granados, M. A., y Rubio, D. (2020). Breve revisión del uso de microalgas para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales. *Gestión y Ambiente*, 23(1), 127–137. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n1.84034>

31. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021, 21 de agosto). Semarnat actualiza NOM 001 sobre descargas de aguas residuales, tras 25 años de parálisis [Comunicado de prensa]. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/semarnat-actualiza-nom-001-sobre-descargas-de-aguas-residuales-tras-25-anos-de-paralisis?idiom=es>
32. Tejada, C., Quiñonez, E., y Peña, M. (2014). Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión. Revista Facultad De Ciencias Básicas, 10(1), 80-101. <https://doi.org/10.18359/rfcb.341>