



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Contaminantes emergentes

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Raúl Barreto Rosales

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Enrique Cesar Valdez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Dedicatoria

A través del tiempo, la vida me ha reafirmado en cada uno de los obstáculos a los que me enfrento y que tengo que superar, las enseñanzas de mis profesores.

Será un honor para mí, seguir compartiendo mis conocimientos adquiridos con mis hijos y con la sociedad. Muy importante destacar que el trabajo en equipo es de mucho valor y que en nuestro país es escaso. En este trabajo se muestra la importancia del trabajo multidisciplinario que deberá llevarse a cabo para cumplir con el principal objetivo del Ingeniero Civil.

La satisfacción de haber sido estudiante en esta escuela es infinita, la preparación que me ofreció esta Universidad es invaluable. El tiempo dedicado por cada uno de los profesores de esta casa de estudios a sus alumnos es y seguirá siendo el tesoro que podemos heredar cada uno de los alumnos que llegamos a ser parte de esta gran casa de estudios.

A cada uno de los profesores de esta facultad debo mis logros, contribuyeron en mi formación profesional. A todos ellos dedico este trabajo. Especialmente al Dr. Enrique Cesar Valdez, quien en todo momento me ofreció su apoyo para la elaboración de este trabajo.

Agradecimientos

Un gran agradecimiento el que tengo para la Universidad Nacional Autónoma de México por ser parte tan importante en mi formación académica profesional.

Al Dr. Enrique Cesar Valdez por su gran apoyo para la elaboración de este trabajo, agradezco su infinita paciencia.

A la Dra. María del Rosio Ruiz Urbano; A la Maestra en Ingeniería Alba Vázquez González; Al Maestro en Ingeniería Sergio Tirado Ledezma; Al Maestro en Ingeniería Cristian González Reyes y a todos los profesores que me fortalecieron con su catedra en la Ingeniería Civil, dentro de esta Facultad de Ingeniería, doy gracias infinitas por su apoyo.

Muchas son las personas que me animaron a seguir con este propósito, sin embargo y a pesar de pasar tanto tiempo para lograr llegar a este momento, las palabras de mis seres queridos, profesores y amigos dejaron profunda huella en mí, que hasta el día de hoy siguen presentes en mi conciencia y me anima a seguir adelante.

A mis progenitores: Basilio Barreto Jiménez y Elvira Rosales Barrera; a mis hijos Juan Pablo Barreto Arana y Raúl Barreto Arana; a mi Esposa Gabriela Miranda Vázquez; a mis hermanos Roberto Barreto Rosales, Benjamín Barreto Rosales y Sara Barreto Rosales, agradezco su gran apoyo y confianza en mí para lograr este objetivo.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/028/16

Señor
RAÚL BARRETO ROSALES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

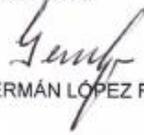
"CONTAMINANTES EMERGENTES"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. CONTAMINANTES EMERGENTES
- III. SITUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN MÉXICO
- IV. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES
- V. MEDIDAS DE MITIGACIÓN
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 14 de marzo del 2016.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Índice de Contenido

Introducción	1
Objetivo.....	4
Capítulo I Contaminantes Emergentes.....	5
1.1 Generación de contaminantes emergentes en el mundo.....	5
1.2 Contaminantes emergentes en México.....	10
Capítulo II Situación de la calidad del agua en México.....	11
2.1 Medición de la calidad del agua.....	11
2.2 Calidad de los cuerpos de agua.....	11
2.3 Calidad de las fuentes de agua superficial.....	12
2.4 Calidad de las fuentes subterráneas.....	12
2.5 Calidad del agua potable.....	13
2.6 Origen de la mala calidad y acciones de saneamiento.....	14
2.7 Normatividad para prevenir y controlar la contaminación del agua.....	26
Capítulo III Impacto ambiental de los contaminantes emergentes.....	27
3.1 Clasificación de contaminantes emergentes.....	28
3.1.1 Fármacos.....	29
3.1.2 Retardantes de llama bromados.....	31
3.1.3 Parafinas cloradas.....	33
3.1.4 Pesticidas polares y metabolitos.....	35
3.1.5 Compuestos perfluorados.....	35
3.1.6 Las drogas de abuso.....	36
3.2 Identificación de impactos en el ambiente.....	36

3.2.1 Calidad del agua.....	36
3.2.2 Ecosistema.....	37
3.2.3 Salud Pública.....	39
3.3 Evaluación de impactos en el ambiente.....	39
3.3.1 Metodología aplicada.....	40
3.3.2 Conclusión del análisis.....	44
Capítulo IV Medidas de mitigación.....	45
4.1 Medidas preventivas.....	45
4.2 Medidas de control.....	46
4.2.1 Tratamientos fisicoquímicos.....	46
4.2.2 Procesos biológicos.....	46
4.2.3 Procesos avanzados.....	46
4.2.4 Tratamientos combinados.....	47
4.2.5 Humedales artificiales.....	50
4.2.5.1 Métodos de eliminación de contaminantes.....	53
4.2.5.1.1 Sistemas de flujo superficial (FS).....	53
4.2.5.1.2 Sistema de flujo subsuperficial (FSS).....	54
4.2.5.1.3 Componentes de un humedal artificial de flujo subsuperficial.....	56
4.2.5.1.4 Mecanismos básicos de depuración en un humedal artificial.....	57
4.2.5.2 Métodos de eliminación de contaminantes.....	58
4.2.5.3 Sólidos suspendidos.....	59
4.2.5.4 Materia orgánica.....	59
4.2.5.5 Nitrógeno.....	62

4.2.5.6 Fósforo.....	63
4.2.5.7 Patógenos.....	63
Capítulo V Conclusiones.....	65
Anexos.....	67
Glosario.....	76
Acrónimos y Siglas.....	81
Referencias bibliográficas.....	82

Índice de Figuras

Figura i.1	Ciclo del agua	3
Figura 2.1	Zonas muestreadas para los análisis fisicoquímicos	16
Figura 2.2	Sitios muestreados para análisis de contaminantes emergentes.....	20
Figura 2.3	Compuestos con mayor frecuencia encontrados en 19 pozos.....	21
Figura 3.1	Disponibilidad de un gran número de productos difundidos mediante publicidad.....	27
Figura 3.2	Recorrido de los PPCPs en el medio ambiente.....	28
Figura 3.3	Ciclo que se presenta por el uso de medicamentos.....	29
Figura 3.4	Aumento en la elaboración de productos electrónicos.....	31
Figura 3.5	Uso de retardantes de llama bromados en algunos productos de uso diario.....	32
Figura 4.1	Humedal artificial en CCH Sur.....	51
Figura 4.2	Humedal artificial de flujo superficial.....	54
Figura 4.3	Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal.....	55
Figura 4.4	Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Clases de contaminantes emergentes	6
Tabla 2.1 Resultados de los análisis físico químicos de las zonas muestreadas.....	18
Tabla 2.2 Coincidencia de contaminantes detectados en el Valle del Mezquital, en tres estudios.....	22
Tabla 2.3 Diferencias de los contaminantes que se han encontrado en los últimos tres estudios.....	23
Tabla 2.4 Contaminantes emergentes ordenados de mayor a menor riesgo.....	25
Tabla 2.5 Límites permisibles para agua potable.....	68
Tabla 3.1 Valoración cualitativa.....	42
Tabla 3.2 Matriz de impacto.....	43
Tabla 4.1 Reacciones catalizadas por peroxidasas y lacasas para algunos contaminantes aromáticos.....	48
Tabla 4.2 Mecanismos de depuración en humedales artificiales.....	58

Introducción

La principal misión de los seres humanos en este planeta es preservar la especie, y esto se logrará manteniendo el equilibrio ecológico. En lo referente al agua, que hoy en día está en su mayoría contaminada, será de gran importancia conservar su calidad, esto es, evitar el deterioro de sus características físicas y químicas. Sin embargo, en las grandes ciudades, pertenecientes principalmente a países en vías de desarrollo, la tendencia ha sido satisfacer la demanda de agua en cantidad, más que en calidad.

En cualquier actividad en la que el ser humano utiliza el agua, se modifican sus características, por lo que es recomendable realizar el monitoreo continuo de su calidad para saber qué procesos de tratamiento deben llevarse a cabo cuando se requiera, para realizar así la descarga, de tal forma que pueda ser reutilizada o reintegrada a la naturaleza.

Para el uso y consumo humanos debe contarse tanto a nivel doméstico como comercial e industrial, con agua potable, por lo que ésta deberá cumplir con la 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”.

Dado que una de las principales actividades de la Ingeniería Civil es satisfacer servicios públicos básicos, como proveer de agua potable a las poblaciones y el correcto manejo de las aguas residuales, es importante desarrollar estudios e investigación relativa a los contaminantes emergentes en nuestro país.

Los productos farmacéuticos son sustancias altamente solubles en agua, que se liberan al 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.

Aunque no se trata de productos persistentes, son constantemente utilizados y vertidos, y en general los sistemas de tratamiento convencionales de agua potable y aguas residuales no son capaces de eliminarlos, por lo que su concentración aumenta en los ecosistemas acuáticos. Los sistemas de tratamiento deben considerar la remoción de dichos contaminantes.

En el Capítulo I Contaminantes emergentes se aborda el concepto de contaminantes emergentes, cómo se generan y una clasificación de ellos citando ejemplos de cada uno, así como estudios que se han realizado en algunos países, incluyendo México.

En el Capítulo II Situación de la calidad del agua en México. Se hace una descripción de la situación de la calidad del agua en México presentando resultados obtenidos de los estudios realizados por diversas instituciones como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), proponiendo políticas que deben aplicarse en el tratamiento y disposición de las aguas residuales.

El Capítulo III Impacto ambiental de los Contaminantes emergentes, describe las principales clases de contaminantes emergentes, analizando cómo impactan al medio ambiente, mediante la elaboración de una matriz de impacto ambiental.

El Capítulo IV Medidas de mitigación, describe la utilización de tratamientos fisicoquímicos, tratamientos combinados, así como procesos biológicos y avanzados para disminuir el impacto ambiental generado por la presencia de contaminantes emergentes en el medio ambiente.

El Capítulo V Conclusiones, detalla el análisis realizado a través de la matriz de impacto, aplicado a las diferentes clases de contaminantes emergentes.

Dentro del ciclo de vida del agua, se hace referencia de la presencia de contaminantes emergentes, en este caso considera las distintas actividades humanas y compartimentos ambientales, donde se produce la alteración de la calidad del agua producto de la presencia de estos contaminantes emergentes.

La Figura i.1 muestra cómo afectan dentro del ciclo del agua, cada una de las actividades humanas.

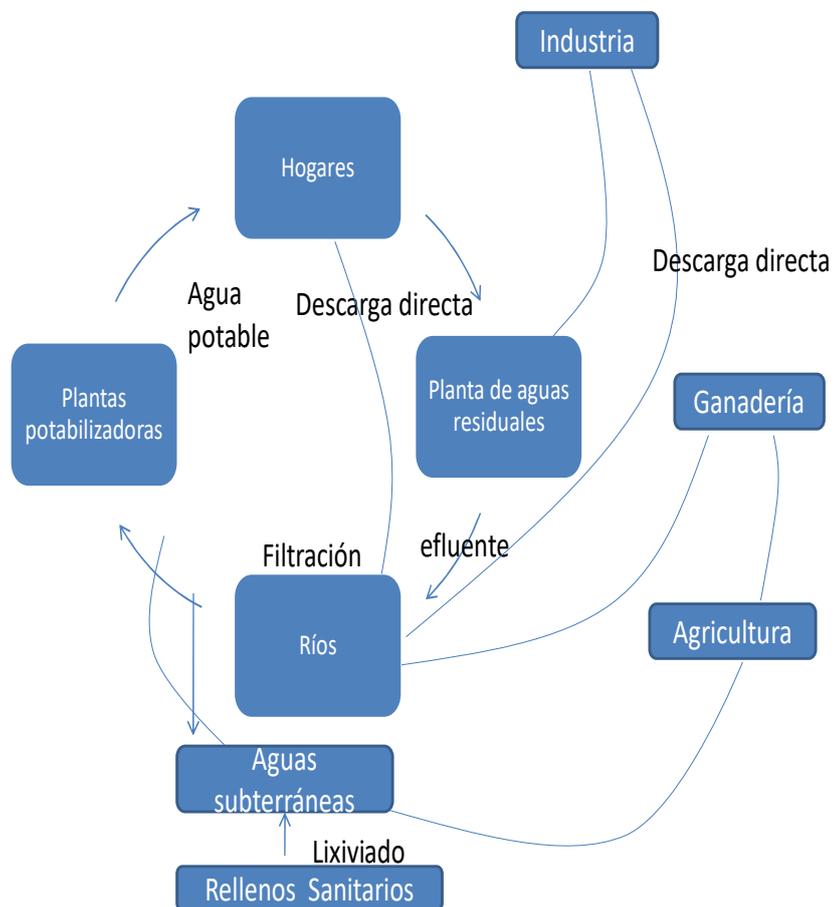


Figura i.1. Ciclo del agua (Petrovic M, Gonzalez S, Barcelo D(2003)

Objetivo

El objetivo de esta tesis es describir los efectos en la salud y en el ambiente de los contaminantes emergentes hasta ahora conocidos, presentes en las aguas residuales, así como las medidas de control que se están considerando en países desarrollados.

Alcances

Utilizando un lenguaje común, comentar los procesos utilizados para la eliminación de algunos de los contaminantes emergentes presentes en aguas residuales.

Capítulo I

Contaminantes emergentes

En un artículo de Becerril E. publicado en la Revista Digital Universitaria UNAM, se define a los "contaminantes emergentes" como aquellos que corresponden en la mayoría de los casos a contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia. En dicho artículo se mencionan como ejemplos particularmente relevantes de los compuestos que han emergido recientemente, los siguientes: surfactantes, que son compuestos químicos que se utilizan en la industria como los alquifenoles etoxilados y los sulfonatos bencénicos usados en productos de higiene corporal. Productos farmacéuticos, como antibióticos, analgésicos y antiinflamatorios. Productos para el cuidado personal, como protectores de piel, cremas. Aditivos de las gasolinas, retardantes de fuego, antisépticos, aditivos industriales, esteroides y hormonas y subproductos de la desinfección del agua. La característica de estos grupos de contaminantes es que no necesitan persistir en el ambiente para causar efectos negativos, puesto que sus altas tasas de transformación/remoción se pueden compensar por su introducción continua en el ambiente. Para la mayoría de estos contaminantes emergentes, la incidencia, la contribución de riesgo y los datos ecotoxicológicos no están disponibles, así que es difícil predecir qué efectos de salud pueden tener en seres humanos y organismos acuáticos (Damià Barceló, 2003).

En la Tabla 1.1 se listan algunas clases de estos compuestos.

1.1. Generación de contaminantes emergentes en el mundo

Una población siempre creciente ha forzado al estado a obtener más agua, ya sea de fuentes superficiales o subterráneas.

La gran concentración poblacional en grandes urbes y los altos niveles de consumo hacen que estos compuestos vayan a parar a las aguas naturales vía aguas residuales urbanas y plantas de tratamiento que en muchos casos no son capaces de degradarlos, y ya desde hace varios años vienen siendo detectados en efluentes de plantas de tratamiento, aguas continentales, marinas, subterráneas e incluso en agua de consumo humano.

Becerril Bravo José Elías.

Damià Barceló (2003), Emerging pollutants in wáter analysis

TrAC Trends in Analytical Chemistry, Volume 22, Pages xiv – xvi.

La producción mundial de residuos peligrosos podría estimarse en una cifra superior a los 350 MM Ton/año (mil millones de toneladas al año) y hasta próxima a los 400 MM Ton/año, dato más que elocuente en relación con la magnitud del problema. El 90% de esta cifra corresponde a los países industrializados, en los que la generación de estos contaminantes es mayor. Son también estos países los que poseen una mayor capacidad de respuesta. En este sentido, los problemas de residuos peligrosos emergentes en países con un crecimiento industrial importante en los últimos años presentan una particular gravedad. Así, países como Brasil, México y Corea del Sur pueden estar en la actualidad en niveles de producción de residuos peligrosos en torno a los 5 MM Ton/año cada uno (Rodríguez, 1999).

Tabla 1.1. Clases de contaminantes emergentes

Clase de contaminante	Ejemplo
Productos farmacéuticos Antibióticos de uso médico y veterinario.	Trimetoprima, eritromicina, lincomicina, sulfametoxazol.
Medicamentos analgésicos y anti-inflamatorios.	Codeína, ibuprofeno, acetaminofen, ácido acetilsalicílico, diclofenaco.
Medicamentos psiquiátricos reguladores de lípidos.	Diazepam, fluoxetina, carbamazepina, Bezafibrato, ácido clofibrico y fenofibrico, atorvastatina.
Betabloqueadores	Metoprolol, propanolol, timolol, atenolol.
Medios de contraste de rayos X	Lopromide, iopamidol, diatrizoato.
Esteroides y hormonas (anticonceptivos)	Estradiol, estrona, estriol.

Clase de contaminante	Ejemplo
<p>Productos de cuidado personal</p> <p>Perfumes</p> <p>Agentes de protección solar</p> <p>Repelentes de insectos</p>	<p>Fragancias, policíclicos y macrocíclicos.</p> <p>Benzofenona, metilbenzilidone.</p> <p>N, N-dietiltoluamida.</p>
Antisépticos	Triclosan, clorofeno.
Detergentes, tensoactivos y sus metabolitos.	Alquifenoles etoxilados, alquifenoles (nonilfenol y octilfenol), alquifenoles carboxilados.
Retardadores de llama	<p>Difenil éteres polibromados</p> <p>Tetrabromo bisfenol A, tris(2cloretil) fosfato</p>
Aditivos y agentes industriales	Agentes quelantes, sulfonados aromáticos.
Aditivos de gasolina	Dialquil éteres. Metil-t-bitil éter.
Subproductos de desinfección.	Yodo, trihalometanos, bromoacidos, bromoacetnitrilos, bromoaldehidos, bromato.

Fuente: Barcelo',D.2003

Los procesos químicos de desinfección en el tratamiento para agua potable conducen a la formación de subproductos de desinfección que son indeseables, debido al potencial de toxicidad crónica (WHO.IARC, 1990). Por lo general, son el resultado de la oxidación de componentes de la mezcla en el agua. Existe un debate sobre la importancia de la desinfección por productos en comparación con el riesgo de enfermedades transmitidas después del tratamiento (AMES, B.; MAGW, R y GOLD, L. 1987), ya que aunque la desinfección reduce el riesgo de infección patógena, puede representar una amenaza para la salud humana, debido a los residuos de desinfectantes y sus subproductos (DSP) (COLMAN, Joan et al. 2011),(SADIQ, Rehan y RODRIGUEZ, Manuel J. 2004), los cuales se forman principalmente cuando los desinfectantes reaccionan con la materia orgánica, de origen natural, y los contaminantes antropogénicos, tales como bromuro y yoduro (HEBERT, Armelle; et al. 2010), quedando presentes en el agua. Además, con el fin de asegurar la desinfección lo mejor posible, muchos proveedores han introducido múltiples metodologías, en las que combinan desinfectantes de uso común (cloro, ozono, dióxido de cloro y cloraminas) en las plantas de tratamiento, donde cada combinación puede interactuar con la materia orgánica disuelta para producir sus propios DSP en el agua (RICHARDSON, Susan 1998), (RICHARDSON, Susan; et al. 2007). Se han identificado más de 250 DSP, pero solo se conoce adecuadamente el comportamiento de 20 DSP (SADIQ, Rehan y RODRIGUEZ, Manuel J. 2004). Entre ellos está el cloro, ampliamente usado para la desinfección de agua porque es relativamente barato y eficaz en la eliminación de microorganismos patógenos, y proporciona protección residual en los sistemas de distribución de agua (NIKOLAOU A. D.; et al. 2004). Sin embargo, el cloro y sus especies relacionadas reaccionan para producir DSP. De estos, los trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (AHA) se encuentran en mayores concentraciones en el agua potable tratada (RICHARDSON, Susan 2003); entre ellos, los que han sido investigados incluyen yodo-THM y yodo ácidos, que se encuentran en niveles más altos después de la cloración; subproductos de ácidos hipobromosos (producto de la reacción entre el bromuro y el ozono) con materia orgánica natural, aunque en menores cantidades (HEBERT, Armelle; et al. 2010), (GUNTEN, Urs Von. 2003), halonitrometanos y haloaldehidos, que son realizados por la pre-ozonación; un alto contenido de compuestos mutagénicos MX, que se ven favorecidos por concentraciones de cloro, dióxido de cloro, cloraminas y nitrosaminas que se incrementan por la cloraminación (HEBERT, Armelle; et al. 2010).

En un estudio realizado en el Reino Unido, se reportaron concentraciones de metabolitos de plaguicidas medidos en las aguas subterráneas. Estos metabolitos se originaron a partir de compuestos no autorizados en el Reino Unido como DDT, heptacloro y atrazina. Estas tres sustancias son parte de la lista de las doce sustancias tóxicas más utilizadas en el mundo, incluidas en el tratado de las Naciones Unidas de mayo de 2001 firmado en Estocolmo, Suecia; un total de 127 países adoptaron este tratado (SINCLAIR C. d.; et al 2010).

En Colombia, en una investigación realizada en el Hospital de la Universidad del Norte de Barranquilla, se encontraron sustancias de origen farmacéutico en los efluentes que se descargan al sistema de alcantarillado de la ciudad y éste a su vez en el río, que evidencian que los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben ser modificados. Las sustancias de mayor uso en un hospital de esta categoría son los analgésicos, antiinflamatorios como el diclofenaco, ibuprofeno y otros medicamentos como la aspirina, antisépticos como el triclosán, hormonas como el estriol y el estrona, estimulantes como la cafeína, y otras drogas de uso lícito en centros hospitalarios, como la morfina. Asimismo, al realizar la caracterización química y biológica del agua residual del hospital se observó la presencia de metales pesados (mercurio, platino, gadolinio), anestésicos (alquilfenol, propofol), citostáticos, desinfectantes, analgésicos y antiinflamatorios, medios de contraste y compuestos orgánicos adsorbibles.

En 2012, España era el segundo mayor consumidor de fármacos, por detrás de Estados Unidos, siendo los más consumidos los antibióticos y medicamentos psiquiátricos (El País 2012, Valcárcel et al, 2011)

Los principios activos de los fármacos se obtienen por síntesis orgánica y están diseñados para que tengan un efecto farmacológico concreto en el cuerpo humano. Por ello se diseñan con cierto carácter de estabilidad química y resistencia a la biodegradación, el suficiente para poder alcanzar los sitios de acción específicos (Silva et al, 2012). Otra de sus principales características es su capacidad ionizable en la mayoría de los casos, con el fin de que puedan ser incorporados a la matriz biológica y que conserven su actividad biológica (Jiménez, Cartagena 2011)

Nuestro organismo no es capaz de biotransformar completamente el principio activo, por lo que se excreta parte del fármaco. Finalmente acaba en las aguas residuales, donde las plantas de tratamiento no son capaces de degradar estos compuestos, ya sea porque se encuentran en muy baja concentración o por que no están diseñadas para degradarlos.

Estos compuestos se acumulan tanto en masas de agua, suelo, aire como en tejidos vegetales y animales, bioacumulándose y biomagnificándose en la cadena trófica. (Snyder 2008)

También es importante señalar que los microorganismos pueden desarrollar resistencia y alteraciones enzimáticas por la presencia de nuevos compuestos, lo que tiene repercusiones difíciles de cuantificar (Passos et al. 2011, Jiménez Cartagena 2011).

1.2. Contaminantes emergentes en México

Los últimos estudios de calidad del agua realizados en el Valle del Mezquital (Leseer 2013) corroboran la presencia de contaminantes emergentes en el agua subterránea, agua superficial (manantiales) y canales (Carmona y Muñiz, 2014).

Existen diversos estudios sobre la calidad del agua y el grado de contaminación de los suelos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, entre ellos se encuentran el de Huerta y colaboradores y el de Reyes y colaboradores, los cuales se enfocaron al grado de contaminación de los suelos irrigados con las aguas residuales (Huerta et al., 2002; Reyes Solís et al., 2009), otros estudios han encontrado ya evidencias de contaminación en el agua subterránea (Marín et al., 1998). Gallegos et al. (1999) encontraron contaminación orgánica (nitratos y coliformes fecales y totales) en muestras de agua subterránea en el valle del Mezquital, especialmente en las muestras someras. Page et al. (2010) realizaron un estudio de riesgo microbiológico y concluyen que el riesgo de contaminación del acuífero es alto debido a la falta de un pretratamiento del agua residual recargada y al poco tiempo de residencia del agua descargada al acuífero. Otros estudios como el de Lesser, et al. (2011), determinaron la calidad del agua en 65 pozos analizados químicamente, encontrando que el sodio y los sólidos totales disueltos se encuentran por arriba del límite máximo permisible y en 30 de 75 pozos analizados bacteriológicamente, detectaron coliformes totales y fecales. Carmona y Muñiz (2014), reportan que la contaminación emergente existe en el Valle del Mezquital, sin embargo, existe tecnología para potabilizar el agua para consumo humano.

Capítulo II

Situación de la calidad del agua en México

El objetivo de este capítulo es dar a conocer cómo a través de los años se ha avanzado en legislación en materia de la calidad del agua en México y definir cuáles son los principales problemas de contaminación, sus orígenes y la efectividad de las políticas públicas aplicadas para solucionarlos.

2.1 Medición de la calidad del agua

Se puede medir la calidad del agua si se define un uso y se asocian a éste, parámetros y valores. Es difícil seleccionar un número adecuado de parámetros relevantes para una situación específica y, fácil de medir desde un punto de vista técnico, económico e institucional. Es necesario determinar que parámetros afectan el uso del agua, dada la amplia variedad de compuestos contaminantes que existen (700 000 compuestos aproximadamente, de origen antropogénico). Para definir los compuestos contaminantes y los valores en que pueden ser tolerables para cada uso del agua, debe existir suficiente conocimiento científico, así como la experiencia. En el país se han desarrollado diversos métodos para medir la calidad del agua; algunos han sido aplicados por el gobierno federal y otros por instituciones académicas.

2.2 Calidad de los cuerpos de agua

La Red Nacional de Monitoreo en 2008 constaba de 389 estaciones permanentes (207 localizadas en cuerpos de agua superficial, 52 en costas y 130 en acuíferos) y 285 móviles (241 localizadas en cuerpos de agua superficial, 19 en costas y 25 en acuíferos (CONAGUA 2008).

En 2011 se contó con 1815 sitios distribuidos en nuestro país.

Los resultados obtenidos en estos monitoreos se realizan para las ciudades más pobladas y algunas zonas industriales, por lo que se carece de información en sitios alejados del centro, como algunos estados del norte y de las penínsulas de Baja California y Yucatán, al igual que en zonas económicamente marginadas como Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

Es importante destacar que las estadísticas del agua reportan datos únicamente en función del contenido de materia orgánica [Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)] y de sólidos suspendidos totales (SST).

2.3 Calidad de las fuentes de agua superficial

Los cuerpos de agua superficial aportan cerca de 30% del total de agua para consumo humano (uso municipal). Estos cuerpos son altamente propensos a sufrir problemas de contaminación debido a que están expuestos, y por descargar el agua residual y la basura en ellos.

El origen de los contaminantes de estas fuentes de agua son las descargas de aguas negras, como las que provienen del río Lerma en el caso de Chapala (De Anda Sánchez y Maniak, 2007). Estudios recientes en el Lago de Chapala reportan la presencia de metales pesados (plomo, cadmio y arsénico) en concentraciones por encima de los límites máximos permitidos por la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) y la Norma Oficial Mexicana (Ayla y Ford, 2001), así como de dioxinas en peces del lago de Pátzcuaro (López y Zamora, 2007).

Por otra parte, en trece de las catorce presas consideradas en el plan de monitoreo de la CONAGUA (2008), su calidad está clasificada entre buena y aceptable, mientras que la presa Endho, en Hidalgo, está catalogada como fuertemente contaminada debido a que recibe y almacena gran parte de las aguas residuales no tratadas de la Ciudad de México. En este caso, al igual que en muchos otros, la manera de evaluar la calidad del agua impide visualizar otros problemas de contaminación, como es el caso de la presencia de arsénico y de contaminantes emergentes en las presas de la Comarca Lagunera.

2.4 Calidad de las fuentes subterráneas

El 70% de agua para consumo humano se extrae de fuentes subterráneas. No obstante su importancia, los datos acerca de su cantidad y calidad son más limitados que para el agua superficial. El escaso interés en las aguas subterráneas mostrado por el gobierno y por la sociedad se debe en parte a que estas reservas de agua están expuestas. De hecho, la falta de datos públicos sobre la calidad de estos cuerpos de agua disminuye la presión por contar con programas para su preservación.

Existe ambigüedad en lo que se entiende por la contaminación del agua subterránea, ya que algunos profesionales limitan el concepto a la modificación de la calidad original y se enfocan en la presencia de sales iónicas por lo general inocuas para la salud, sin que ello necesariamente afecte su uso. En tanto que otros, además de considerar lo anterior, extienden el concepto a la presencia de contaminantes como el nitrógeno en todas sus formas, detergentes, fósforo, bacterias coliformes fecales, material orgánico y metales pesados que tienen efectos en la salud o en el equilibrio ecológico.

La calidad del agua de acuíferos se deteriora por la sobreexplotación y las descargas de contaminantes. Estas descargas pueden ocurrir no solo por el vertido de aguas residuales al suelo o directamente en los mantos freáticos, sino también por fuentes difusas, como son los lixiviados provenientes de los numerosos basureros lícitos mal diseñados o clandestinos a lo largo del país. En cuanto a los problemas de calidad del agua producidos por la sobreexplotación, el más estudiado es sin duda el de la intrusión salina, lo que ocurre por la introducción del agua de mar en acuíferos costeros o por el lavado de suelos salinos en zonas áridas y semiáridas. Otro problema de calidad que resulta de la sobreexplotación, y que tiene efectos severos en la salud, es la concentración de manera natural o artificial de flúor y arsénico.

Datos reportados por la CONAGUA en 2006 muestran que existe infiltración de aguas residuales en ocho acuíferos del centro del país y uno en la península de Yucatán. Lo anterior se ha visto reflejado en un contenido de nitrógeno amoniacal y nitratos que excede el límite máximo permitido por la norma de agua potable en los acuíferos de Mérida, Tlaxcala y el Valle de Tula, en Hidalgo (Muñoz et al., 2004; Graniel et al., 1999 y Ryan, 1989).

2.5 Calidad del agua potable

Para ser potable, el agua debe cumplir los límites de los 48 parámetros de calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM 127- SSA1- 1994. El suministro y la calidad de dicha agua es responsabilidad de los municipios quienes tienen la atribución de decidir si la distribución a los usuarios es administrada por el gobierno o por la iniciativa privada. Para el año 2007 se logró una cobertura del recurso cercana a 90% en todo el país; sin embargo, no toda el agua entregada contó con la calidad de potable conforme a la normatividad (CONAGUA, 2008).

El tratamiento de agua para consumo humano depende de la calidad del agua cruda. El agua subterránea es generalmente de buena calidad por lo que, en la mayoría de los casos, solo se desinfecta con cloro. El agua superficial, en cambio, requiere un tren de tratamiento consistente en la remoción de minerales, sólidos suspendidos y materia orgánica. Cuando las fuentes de agua subterránea están contaminadas, el tren de tratamiento puede ser incluso mucho más complejo que el descrito. En 2007 existían 541 plantas potabilizadoras en el país, las cuales operaban únicamente a 72% de su capacidad de diseño (CONAGUA, 2008). Estas plantas procesaban cerca de 1/3 del agua potable y el resto, por su origen, era solo desinfectado.

La Secretaría de Salud, por medio de la Comisión Federal para la Prevención de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), es la responsable de verificar el cumplimiento de la norma de agua potable y de tomar acciones cuando los valores obtenidos excedan los límites establecidos.

2.6 Origen de la mala calidad y acciones de saneamiento

La principal causa de contaminación de las fuentes de agua es la inadecuada disposición de las aguas residuales y residuos sólidos.

Las fuentes de contaminación del agua pueden ser de dos tipos: Puntuales y difusas. Las primeras pueden ser de origen municipal o industrial y las fuentes difusas son de naturaleza muy variada, como son el drenaje agrícola, la escorrentía proveniente de campos agrícolas o de pastoreo, la escorrentía pluvial, las fugas en tuberías que transportan combustibles o en gasolineras y las fugas en la red de alcantarillado.

La CONAGUA se ha dado a la tarea de promover el tratamiento de las fuentes puntuales de origen municipal, ya que la cobertura de alcantarillado sigue siendo limitada (86%) y, solo existe infraestructura de tratamiento para 32.6% del agua colectada, con el agravante de que, no toda el agua que es tratada cumple con la normatividad correspondiente.

No basta con incrementar el número de plantas y el volumen de agua tratado que cumpla con la normatividad. La estrategia para controlar la contaminación debe incluir una política de incentivos y sanciones para quienes produzcan, usen o descarguen sustancias tóxicas que no puedan ser removidas en plantas de tratamiento o que incluso resulten dañinas para su operación. El manejo integral de las cuencas debe ser otra acción de la estrategia, a través de un programa para la preservación y mejoramiento de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas bajo las condiciones actuales y con proyecciones futuras.

En el ambiente existen millones de compuestos químicos naturales y sintéticos que tienen el potencial de ingresar al agua, se han generado miles de productos químicos para aliviar enfermos, limpiar, mejorar el confort y el progreso del hombre. Estos químicos, una vez que son desechados o eliminados por nuestro cuerpo, pueden acumularse en el agua, llegan a las plantas de tratamiento de aguas residuales y pueden pasar a través de sus procesos unitarios sin sufrir modificación alguna. En México el efluente de la mayoría de estas plantas de tratamiento es descargado a los distritos de riego, permitiendo que estos contaminantes puedan ingresar a los acuíferos en forma de trazas, por otro lado, una amplia gama de sustancias usadas en la agricultura y otros propósitos han contribuido a la contaminación de cuerpos de agua superficial y subterránea.

Por la importancia que representan los estudios que se realizan sobre el Valle del Mezquital para aprovechar su gran potencial acuífero, describiré resultados de algunos estudios realizados en los últimos años. Estos datos podrán ser utilizados como base para una posterior legislación en materia de contaminantes emergentes en México, la cual hasta el día de hoy no la tenemos.

El Valle del Mezquital se localiza a 80 km al norte de Ciudad de México. Pertenece al Estado de Hidalgo y abarca las regiones de Actopan, Mixquiahuala, Ixmiquilpan, Tasquillo, Tula de Allende y Alfajayucan.

Se ha estudiado la calidad del agua superficial y subterránea del Valle del Mezquital, los estudios han detectado por arriba de los límites de la Norma NOM-127-SSA1-1994: sodio, arsénico, coliformes totales, coliformes fecales, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fierro, sulfatos, cloruros, dureza, manganeso, aluminio, fluoruros, bario, fosfatos, mercurio, plomo, cadmio, cobre y zinc. Además, se han detectado 23 de los 224 parámetros de contaminantes “no regulados” (cafeína y naproxeno entre otros) en 30 sitios, principalmente se encontraron en el agua de los canales con concentraciones bajas y solamente trazas o ultratrazas en el agua subterránea. Diferentes autores coinciden en que los metales tienden a ser retenidos por la capa superficial del suelo, por lo cual el agua subterránea aprovecha un primer tratamiento natural del suelo a la hora de filtrarse al subsuelo.

Lesser, et al., en el 2011, realizaron análisis físico-químicos de muestras correspondientes a 65 zonas del Valle del Mezquital, (Figura 2.1.), los resultados fueron comparados con los límites permisibles (LP) para agua de uso y consumo humano, establecidos en la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y se determinó que el Na y los sólidos totales disueltos (SDT) generalmente se encuentran por arriba del LP.

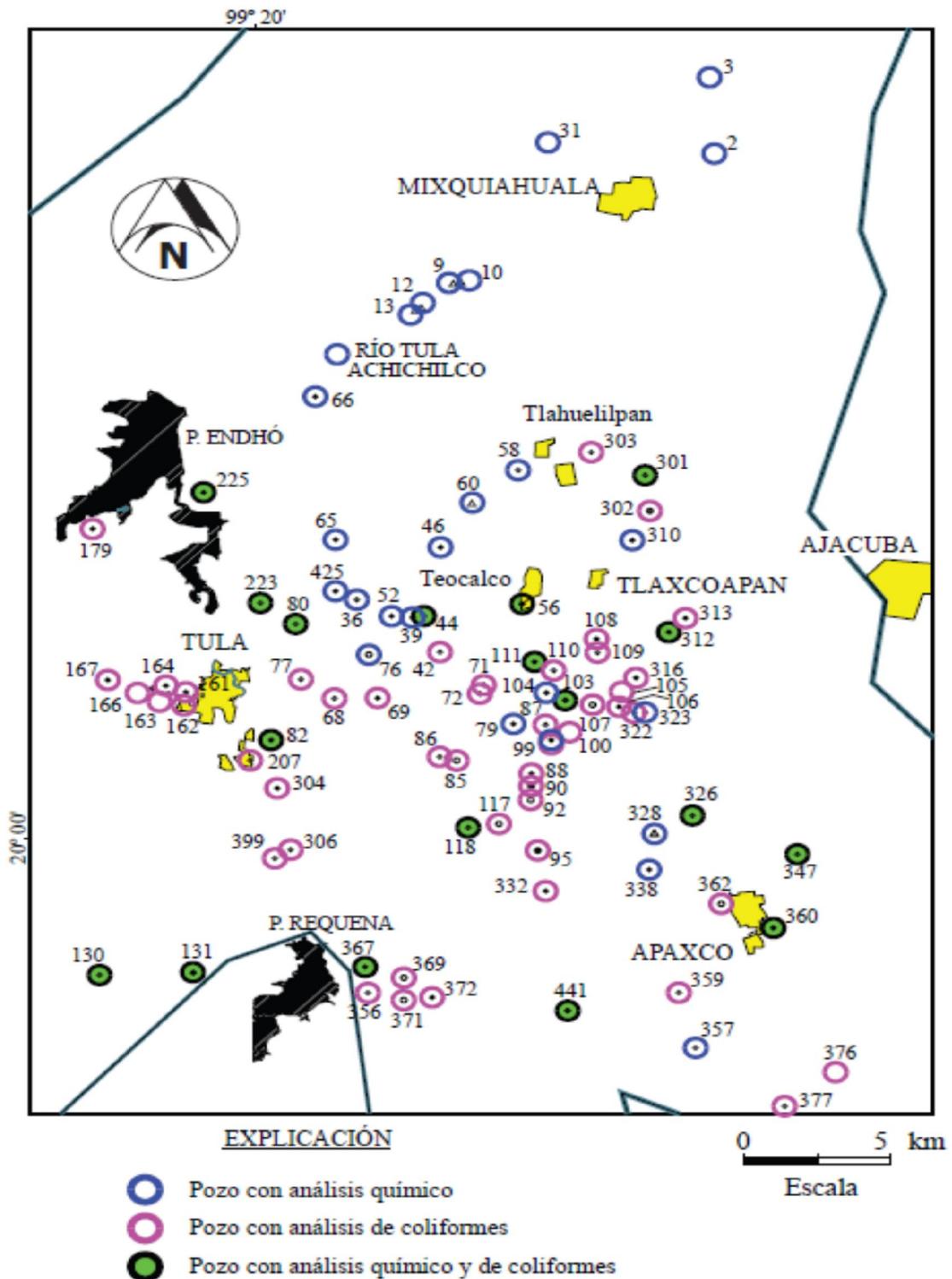


Fig. 2.1 Zonas muestreadas para los análisis físicoquímicos. Tomado de Lesser, et al.,2011

En relación a las determinaciones de elementos químicos, se detectó arsénico en siete aprovechamientos localizados al sur de Tlaxcoapan. La mitad de los sitios analizados presentaron fluoruros por arriba de la norma, y respecto al plomo, la mayoría rebasaron el límite máximo permisible. Los fosfatos y el boro también se presentaron en concentraciones altas en muchas de las muestras (Tabla 2.1). Los STD en las muestras de agua analizadas se encontraron con concentraciones entre 196 y 300 mg/l de STD en el extremo sur del área de estudio. En el extremo norte, alrededor de Xochitlán, los aprovechamientos MZ-27 y MZ-31 presentan menos de 800 mg/l y los cuatro aprovechamientos restantes tienen entre 1060 y 1224 mg/l.

En el estudio citado se explica que en la parte central del Valle del Mezquital, la mayor parte de los aprovechamientos analizados presentan poco más de 1000 mg/l de STD y únicamente el pozo MZ-103 presentó una concentración de 4052 mg/l. En la parte sur del Valle, las concentraciones varían entre 2044 y 2812 mg/l de STD. En la zona de Jilotepec-Taxhimay las concentraciones de boro son del orden de 0.035 mg/l. En el Valle del Mezquital se encuentran concentraciones relativamente altas, entre 0.880 y 2.067 mg/l en la zona entre Tula y Teocalco. También se detectaron valores entre 1.250 y 2.039 mg/l al sur de Tlaxcoapan y concentraciones de 1.019 a 2.206 mg/l al noroeste de Apaxco. De los setenta y cinco análisis bacteriológicos hechos en pozos de agua potable, 25 reciben cloración. De la totalidad de análisis, 30 pozos (40%) presentaron coliformes totales, y también en 8 de ellos a pesar de que reciben cloración; en varias de estas captaciones también se encuentran coliformes fecales. Estas bacterias deberían de estar ausentes en el agua de uso y consumo humano de acuerdo a la normatividad vigente.

Tabla 2.1 Resultados de los análisis físico – químicos de las zonas muestreadas. Lesser, 2011.

POZO No.	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	STD (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	C.E. (µmhos/cm)	TEMP. (°C)	pH
LP	-	-	200	-	250.00	400	1,000	-	-	-	-
MZ-2	61.6	43.8	209	31.3	193	131	1,148	471	1,051	25.0	7.20
MZ-3	61.6	40.0	241	45.1	225	134	1,224	501	1,683	25.9	7.20
MZ-9	122	43.1	209	31.0	226	211		481	1,579	33.0	7.50
MZ-10	67.7	72.6	145	18.3	103	395	1,080	306	1,568	34.2	6.50
MZ-12	84.5	38.1	205	42.9	230	133		445	1,723	24.2	7.30
MZ-13	77.0	39.2	203	35.2	171	169	1,192	477			
MZ-22	26.9	14.7	366	16.7	306	107	1,132	440	1,709	39.5	7.40
MZ-27	64.6	37.1	87.6	13.7	85.5	87.0	768	353	1,043	25.7	7.50
MZ-28	16.9	11.2	293	43.2	196	99.5	1,060	446	1,435	20.7	7.80
MZ-31	33.9	42.5	46.0	2.61	36.0	81.7	496	270	606	25.3	7.30
MZ-36	248	81.3	284	45.9	263	862	2,284	346			
MZ-39	95.4	26.5	340	51.9	285	280		499			
MZ-44	103	32.4	310	33.9	207	381	1,540	452	2,135	24.2	7.30
MZ-46	89.9	29.9	230	34.0	230	92.1	1,120	528			
MZ-52	123	44.8	229	30.4	166	467	1,292	379	1,808	15.5	7.50
MZ-56	63.1	37.1	193	49.3	135	306	1,000	320	1,460	25.3	7.20
MZ-58	96.2	27.5	221	26.9	175	180	1,120	487	1,693	16.9	7.50
MZ-60	84.6	32.1	252	46.1	157	279	1,208	483	1,691	21.0	7.50
MZ-65	133	48.1	226	40.0	259	209	1,428	538			
MZ-66	117	58.0	208	42.9	294	163	1,304	497			
MZ-76	70.0	21.3	211	26.5	167	99.3	1,004	463	1,336	17.7	7.30
MZ-79	76.7	29.4	80.5	28.8	93.0	159	744	252	958	22.9	7.38
MZ-80	175	40.6	194	38.1	247	321	1,540	431	1,825	19.5	7.43
MZ-82	113	24.3	131	36.4	186	101	1,012	384	1,162	18.1	7.50
MZ-100	115	28.4	128	20.8	96.0	319	1,040	260	1,402	24.5	7.35
MZ-103	475	126	496	43.6	405	1,621	4,052	559	3,850	25.1	7.16
MZ-104	36.7	16.2	183	31.5	97.6	177	860	302			
MZ-111	148	57.9	194	44.7	206	499	1,520	282	1,702	23.2	7.31
MZ-118	541	86.2	116	28.2	335	1,103	2,812	352			
MZ-130	40.0	11.2	35.3	5.47	29.5	20.3	344	193	393	22.1	7.10
MZ-134	31.7	10.1	48.8	13.6	36.3	19.8	384	197	402	23.9	7.55
MZ-215	40.9	16.6	61.8	4.60	50.8	32.6	444	231	588	12.6	7.28
MZ-218	80.1	26.9	81.1	4.30	65.3	177		237			
MZ-223	158	41.5	155	28.0	179	330		366			
MZ-225	94.8	69.7	123	34.0	177	171	1,152	451			
MZ-241	13.3	7.10	29.5	3.49	25.0	11.3	252	95.5	216	27.5	8.20
MZ-242	16.4	6.60	29.6	5.19	23.6	4.90		118		26.2	7.54
MZ-243	20.0	11.2	15.5	5.22	11.3	17.4	276	117	224	18.9	7.56
MZ-246	13.3	10.1	18.0	4.73	9.10	20.1	232	99.5	173	24.1	7.64
MZ-251	23.3	11.2	14.5	4.48	20.4	30.5	252	91.5	260	17.8	6.41
MZ-255	18.4	6.10	18.9	4.23	11.3	11.5	232	105	211	17.9	6.81
MZ-266	15.0	8.10	9.91	2.50	6.80	25.1	196	69.7	185	21.5	7.54
MZ-270	38.4	6.10	10.6	2.25	11.3	44.3	244	97.5	344	14.1	7.64
MZ-274	21.7	5.10	20.3	3.24	6.80	20.1	236	111	208	17.3	7.46
MZ-275	13.3	2.00	45.5	4.94	18.2	15.2	244	123	195	25.4	7.43
MZ-279	35.0	11.1	32.0	6.34	18.2	44.8	300	159	418	24.5	7.70
MZ-286	13.9	2.70	29.6	4.38	6.80	13.7	184	109	193	19.5	7.33
MZ-292	10.9	3.30	14.0	4.00	16.3	6.95		53.5	87.0	9.80	8.03
MZ-295	5.50	5.00	10.8	2.51	12.7	5.10		47.5	69.0	16.7	
MZ-301	75.0	33.5	253	18.0	213	132	1,308	517	1,740	20.6	7.23
MZ-310	73.3	22.3	267	21.5	195	161	1,232	489	1,618	21.0	7.26
MZ-312	103	48.7	214	34.7	292	71.5	1,368	543	1,649	18.9	7.27
MZ-323	123	54.8	245	17.6	287	142	1,448	597	1,710		7.30
MZ-326	233	48.2	251	51.3	197	561	2,044	459	2,300	26.5	7.25
MZ-327	375	50.7	327	48.0	403	799	2,704	537	3,700	44.1	7.10
MZ-338	215	46.4	359	45.9	390	455	2,108	586	1,465	22.0	7.20

Se clasificó el agua subterránea de acuerdo a su composición química tomando en cuenta los principales aniones y cationes en solución. Se encontraron tres principales tipos o familias de agua: 1) Agua del tipo sódico-mixta, que se encuentra en los aprovechamientos al poniente de Tlahuelilpan y Teocalco. 2) Familia mixtasulfatada, que se presenta en varios pozos de la parte sur del Valle de Mezquital y que están relacionados con sedimentos evaporíticos del tipo de yesos y anhidritas. 3) Familia mixtabicarbonatada, que corresponde a agua de lluvia de reciente infiltración y la cual se presenta en pozos y manantiales del poniente del Valle del Mezquital, así como en la zona de Jilotepec y San Luis Taxhimay. Las aguas mixtas son aquellas en las cuales no predomina ningún ión (anión o catión) en especial.

En los resultados de los estudios realizados sobre calidad del agua en el Valle del Mezquital (II-UNAM, 2000; Lesser 2007-2008; II-UNAM 2008; FG y Asociados, 2009) se expresa que algunos de los contaminantes fueron encontrados en trazas o micro-trazas por lo que no se consideró que representaran riesgo; sin embargo, existen contaminantes emergentes en micro-trazas que son tóxicos para el ser humano.

En el estudio de calidad del agua del Valle del Mezquital realizado por Lesser y asociados en el 2013, se muestrearon 30 sitios distribuidos en el Valle, 2 en manantiales, 19 en pozos y 9 en canales (Figura 2.2.).

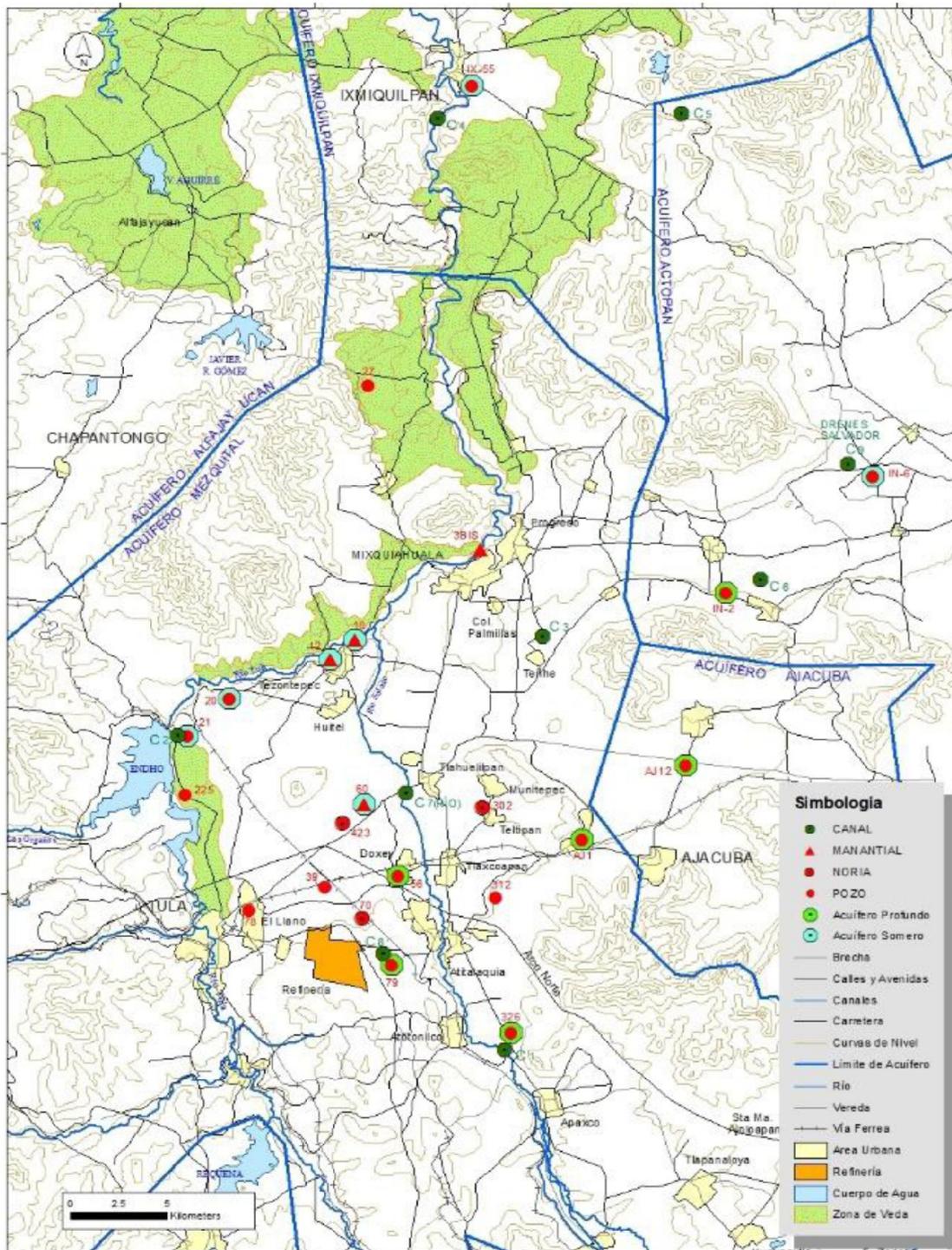


Figura 2.2. Sitios muestreados para análisis de contaminantes emergentes. Tomado de Lesser y asociados en el 2013

De los 224 compuestos emergentes que se determinaron, 118 son originados por fármacos y productos para el cuidado personal, 7 hormonas y 99 compuestos originados por fenoles etoxilados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Los resultados muestran que solo 23 compuestos de los 224 fueron identificados en los pozos y 67 en los canales del Valle del Mezquital, el resto de las determinaciones dieron como resultado ND (no detectado). Ninguna de las hormonas fue detectada en los pozos.

La Figura 2.3 muestra que en los 19 pozos analizados los compuestos encontrados con mayor frecuencia son (Etilexil) ftalato, Dibutilftalato y DEET

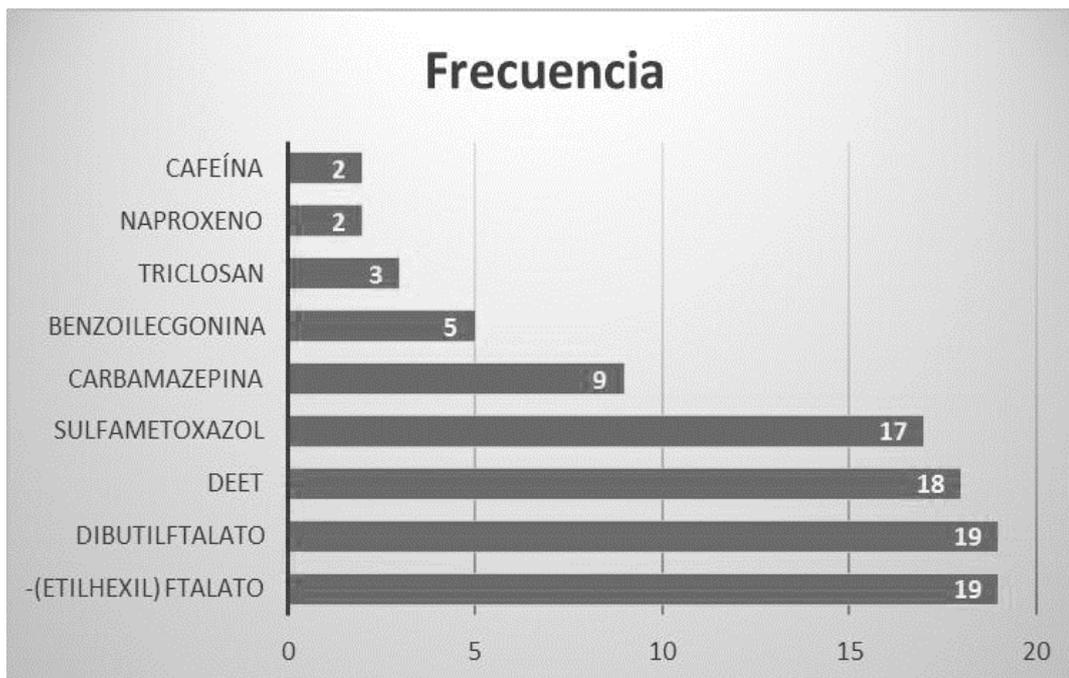


Figura 2.3 Compuestos con mayor frecuencia encontrados en 19 pozos. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014.

En un estudio realizado en 2010 por el IMTA en 18 pozos muestreados se detectó la presencia de DEET, Sulfametoxazol, Carbamazepina, Benzoilecgonina y Cafeína. La Carbamazepina, Naproxeno, Triclosan y BIS- 2-(etilhexil) ftalato se detectaron en los estudios realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2008.

Las fuentes muestreadas por el IMTA y Lesser coinciden en 8 pozos. El Sulfametoxazol, DEET, Carbamazepina, se detectó en los manantiales Cerro Colorado (IMTA, 2010 y Leseer y asociados, 2013) y Tezontepec (Leseer y asociados, 2013) (Tabla 2.2).

U N A M (2008)	I M T A (2010)	L E S S E R (2013)
Nd	Cocaína	Cocaína
Nd	Cafeína	Cafeína
Carbamazepina	Carbamazepina	Carbamazepina
Nd	DEET	DEET
Naproxeno	Nd	Naproxeno
Nd	Sulfametoxazol	Sulfametoxazol
Di-2-etilexilftalato (DEHF)	Nd	Bis-2-(etilhexil)ftalato
Nd	Benzoilecgonina	Benzoilecgonina
Triclosan	Nd	Triclosan

Tabla 2.2 Coincidencia de contaminantes detectados en el Valle del Mezquital, en tres estudios. Fuente: Carmona y Muñiz, 2014.

La coincidencia de contaminantes de los estudios citados ocurre tanto en el espacio como en el tiempo. Estos compuestos pertenecen a diferentes grupos (fármacos, antibióticos, productos para el cuidado personal) (Tabla 2.3)

Tabla 2.3 Diferencias de los contaminantes que se han encontrado en los últimos 3 estudios.

U N A M (2008)	I M T A (2010)	L E S S E R (2013)
Bisfenol-A	Metilprednisolona	Anfetamina
Ibuprofeno	Eritromicina-H2O	Ormetoprim
Ácido salicílico	17-B-estradiol	Dibutilftalato
Butibencilftalato	Acetato 17-B-estradiol	Ofloxacina
Nonilfenol	17- alfa-etinil estradiol	Diltiazem
	Cloroformo	Sulfadiazina
	Benceno	Flumequina
	Dicloropropano	Sulfametazina
	Tricloroetano	Meprobamato
	Dicloroetano	Sulfadimetoxina
	Tolueno	Metformina
	Diclorobutano	Teofilina
	Dimetilamina	Cloxacilina
	1-Cloro-2-metil-1-propeno	Oxacilina
	1,2-Dicloro-2-metilpropano	
	1,1-Dicloro-1-nitroetano	
	1,2-Diclorobutano	
	2-Clorometil-1,3-dicloro-2-Metilpropano	

U N A M (2008)	I M T A (2010)	L E S S E R (2013)
	1,3 - Diclorobutano	
	1,2,3-Tricloro-2-metilpropano	
	Tetraclorobutano	
	Cloro-2-buteno	
	1-Bromo-2,3-diclorobutano	
	1,1,3,3-Tetracloro-2-metilpropano	
	1,3-Dicloro-2-metilpropano	
	Ácido clofibrico	

Fuente: Carmona y Muñiz, 2014.

En el estudio realizado por el IMTA, 2010, se identificaron 32 contaminantes emergentes de los cuales 21 corresponden al grupo de los compuestos orgánicos, volátiles, semivolátiles y fijos; 8 a fármacos y 3 hormonas; de los contaminantes identificados, solo los fármacos coinciden con los resultados de Lesser y asociados, 2013.

El agua que se infiltra al pasar a través de la zona no saturada permite la atenuación de un gran número de contaminantes, pero no de todos, por lo que algunos llegan a los acuíferos. Los materiales de la zona de aireación se comportan como filtros.

La dilución, filtración, neutralización, oxidación-reducción, precipitación-disolución, adsorción-desorción, degradación biológica y síntesis celular participan en la atenuación de contaminantes, incluso, a mayores profundidades, especialmente en donde se encuentran sedimentos no consolidados en la zona no saturada. Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica asociada con el flujo del agua subterránea ocasiona la dilución de contaminantes móviles y persistentes, especialmente en la zona saturada de los acuíferos.

El triclosán, ormetoprim, anfetamina, cocaína y dibutil ftalato ocupan los primeros lugares de toxicidad en la lista, los primeros cinco contaminantes pertenecen al grupo de fenoles etoxilados a excepción del ormetoprim que corresponde al grupo de los fármacos y productos para el cuidado personal (Tabla 2.4.).

Numero CAS	ID	Nombre	Medio de estancia	Ubicación del muestreo
3380-34-5	1	Triclosan	0% agua dulce 99% suelo agrícola	Agua subterránea y agua superficial(canal) Lesser(2013);acuifero (II-UNAM)
6981-18-6	2	Ormetoprim	n/d	Pozo y/o manantial
300-62-9	3	Anfetamina	n/d	Pozos, manantiales y canales.
50-36-2	4	Cocaína	n/d	Pozos y agua de rechazo.
84-74-2	5	Dibutil ftalato	0.2% agua dulce 99% suelo agrícola	Agua subterránea y agua superficial (canal)
82419-36-1	6	Ofloxacina	n/d	Pozo, manantial y canales.
298-46-4	7	Carbamazepina	n/d	Pozos, manantial cerro colorado(IMTA,2010); agua superficial y subterránea(Lesser,2013);acuifero(IIUNAM)
42399-41-7	8	Diltiazem	n/d	Pozos, manantiales y canales.
68-35-9	9	Sulfadiazina	7.9% agua dulce 89.2% suelo agrícola	Pozos o manantial y canales.
22204-53-1	10	Naproxeno	n/d	Agua subterránea y agua superficial (canales)Lesser(2013);acuifero(IIUNAM)
42835-25-6	11	Flumequina	16.1% agua dulce. 100% suelo agrícola.	Pozo o manantial.
723-46-6	12	Sulfametoxazol	n/d	Pozo, manantial cerro colorado y agua de rechazo(IMTA,2010);agua superficial y subterránea(Lesser,2013)
117-81-7	13	Bis-2-(etilhexil)ftalato	0% agua dulce 95.2% suelo agrícola.	Agua subterránea y agua superficial (canales)

Numero CAS	ID	Nombre	Medio de estancia	Ubicación del muestreo
57-68-1	14	Sulfametazina	3.5% agua dulce 95.2% suelo agrícola.	Pozo o manantial y canales.
57-53-4	15	Meprobamato	n/d	Pozo o manantial y canales.
58-08-2	16	Cafeina	16.0% agua dulce 81.6% suelo agrícola.	Pozos y agua de rechazo(IMTA,2010);subterránea y superficial(Lesser)

Tabla 2.4 Contaminantes emergentes ordenados de mayor a menor riesgo.

Fuente: Carmona y Muñiz, 2014.

Con respecto a los patógenos, de las 1,407 especies de microorganismos que se sabe causan enfermedades en seres humanos, 177 (13%) especies se consideran emergentes o reemergentes y, de ellas, 77 (37%) son virus o priones; 54 (10%), bacterias; 22 (7%), hongos; 14 (25%), protozoos y 10 (3%), helmintos. Estos patógenos no están asociados con un hospedero animal específico y pueden persistir en reservorios animales diversos, ya sean mamíferos o no, además de poseer una flexibilidad biológica que les permite aprovechar las oportunidades epidemiológicas que se presentan (Woolhouse and Sonya, 2005).

2.7 Normatividad para prevenir y controlar la contaminación del agua

La normatividad vigente data de 1996, cuando se estableció el marco jurídico para controlar en forma gradual la contaminación y establecer metas de tratamiento en función del reúso del agua tratada o su disposición final. Con la aplicación de dicha normatividad la cantidad de agua tratada en el país se duplicó a partir de 1996.

En la tabla 2.5 (Anexo 1) se resumen los límites permisibles de diversas normatividades, tanto nacional como internacional, de mayor renombre para la calidad de agua potable.

Capítulo III

Impacto ambiental de los contaminantes emergentes

La presencia de contaminantes emergentes en nuestros recursos hídricos es motivo de preocupación acerca de la seguridad del ambiente. Las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales o para uso potable no están diseñadas para eliminar este tipo de contaminantes. Los contaminantes emergentes incluyen una gran variedad de productos de uso diario con aplicaciones tanto industriales como domésticas; algunos de ellos, a raíz de las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años, han sido incluidos en la lista de sustancias prioritarias en el agua. Este es el caso de los retardantes de llama difeniléterespolibromados, los detergentes de tipo alquilfenol etoxilado y sus derivados y las parafinas cloradas. Otros compuestos, como los pesticidas, ya estaban sujetos a la legislación en el agua, pero el descubrimiento de productos de degradación tóxicos, ha renovado el interés por los mismos. Por último, en otros casos, como en el de los detergentes perfluorados, o los fármacos, la toma de conciencia del riesgo que ocasiona su presencia en el medio ambiente es relativamente reciente, y no se tienen aún datos suficientes para una valoración apropiada de su impacto. Además, muchos de ellos, como por ejemplo los retardantes de llama bromados, los detergentes de tipo alquilfenol etoxilado y algunos fármacos, son disruptores endocrinos, lo que implica que una exposición a los mismos puede dar lugar a alteraciones en el crecimiento, desarrollo, reproducción y comportamiento de los organismos vivos, una de las más alarmantes y mejor documentadas es la feminización en organismos acuáticos superiores. La figura 3.1 representa la gran diversidad de productos que nos ofrece la mercadotecnia y de los cuales hemos hecho uso indiscriminadamente por el consumismo.



Figura 3.1. Disponibilidad de un gran número de productos difundidos mediante publicidad.

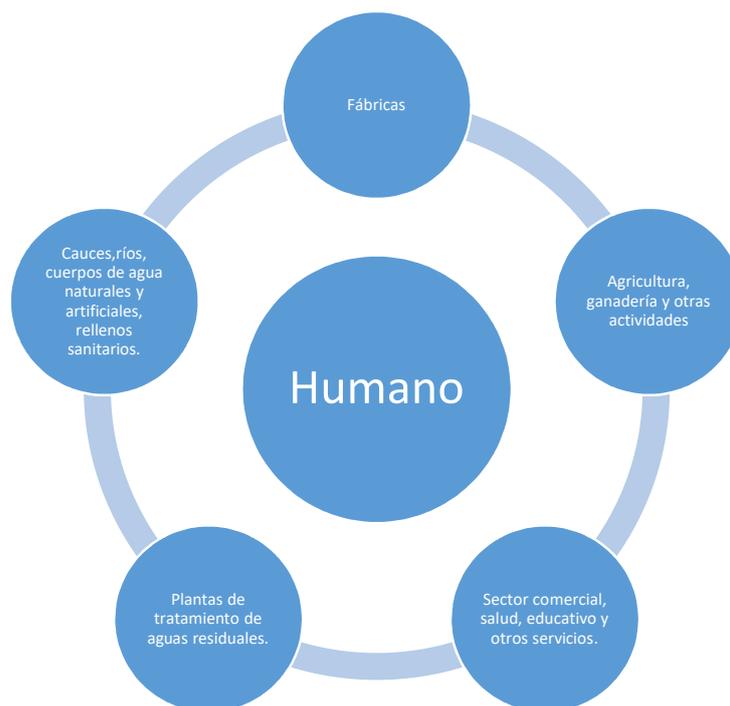


Figura 3.2 Recorrido de los productos de cuidado personal y farmacéuticos en el medio ambiente.

3.1. Clasificación de contaminantes emergentes

Diversos grupos de científicos a nivel internacional han definido entre las clases de contaminantes emergentes las que demandan una mayor atención por la escasez de datos ambientales y ecotoxicológicos y de métodos para su análisis, debido a las posibles consecuencias de su presencia en el medio ambiente. Estas clases de contaminantes emergentes son:

- Fármacos.
- Parafinas cloradas
- Pesticidas polares
- Compuestos perfluorados
- Drogas de abuso
- Metabolitos y/o productos de degradación de las clases de sustancias anteriores.

3.1.1. Fármacos

Las primeras evidencias de los fármacos en el medio acuático se produjeron en los años 70 con la identificación en aguas residuales en EE.UU. del ácido clofibrico, que es el metabolito activo de varios reguladores de lípidos en sangre (clofibrato, etofilin y etofibrato). Sin embargo, no ha sido hasta principios de la década de los 90 que el tema de los fármacos en el medio ambiente ha surgido con fuerza, como demuestran los numerosos artículos publicados desde entonces, los cuales han despertado un gran interés científico y social. Entre los fármacos más prescritos en medicina humana destacan los analgésicos/antiinflamatorios como el ibuprofeno y el diclofenaco, los antiepilépticos como la carbamazepina, antibióticos como la amoxicilina y el sulfametoxazol, y los bloqueantes como el metoprolol. A estos cabe añadir los cada vez más utilizados en veterinaria, en actividades como la acuicultura, la ganadería y la avicultura. Toda esta gama de medicamentos, al ser fabricados y consumidos por el humano, realizan un recorrido formando un ciclo, que puede ser representado en la figura 3.3.

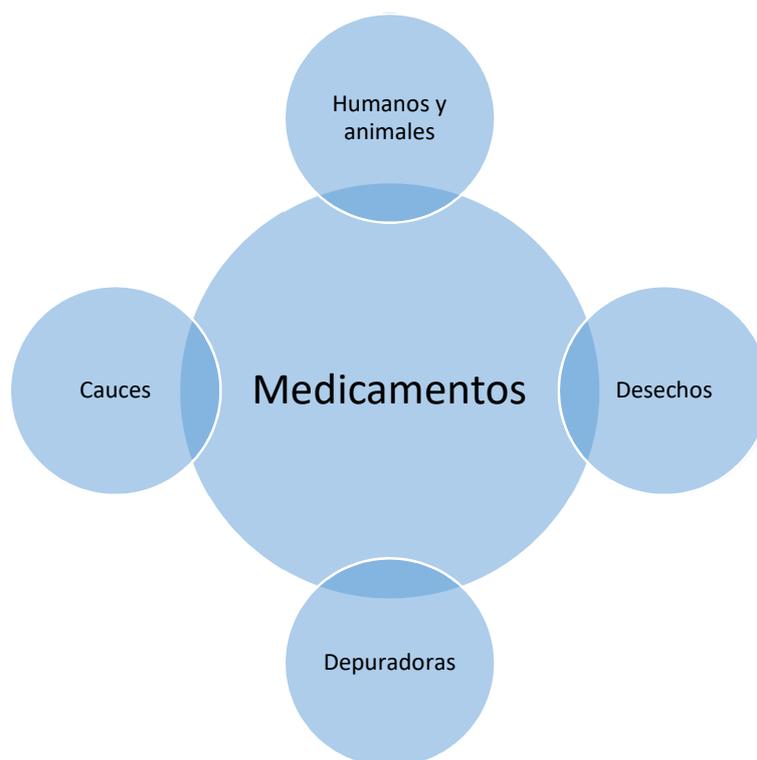


Figura 3.3. Ciclo que se presenta por el uso de medicamentos.

En muchos casos, las consecuencias de su presencia en el medio ambiente no están aún claras, pero en otros existen evidencias del riesgo. Así, por ejemplo, el diclofenaco, aparte de afectar a los riñones en los mamíferos, se ha asociado (como consecuencia de su uso en veterinaria) con la desaparición de los buitres blancos en la India y Pakistán, lo que supone, según el autor de este estudio (Fent K. et al., 2006), un desastre ecológico comparable al acontecido en el pasado con el DDT. Otro ejemplo es el propanolol, que el equipo de investigación del Dr. Barceló ha detectado en múltiples ocasiones en España (Hernando M. D. et al., 2006 b), y que se ha visto tiene efectos sobre el zooplancton, así como sobre los organismos bentónicos. (Fent k et al., 2006).

Como resultado de las investigaciones llevadas a cabo hasta ahora, algunos fármacos están siendo considerados por la US EPA como posibles candidatos a ser incluidos en la lista de los contaminantes orgánicos prioritarios en el agua potable, como es el caso del diclofenaco (antirreumático), la carbamacepina (antiepiléptico), y el cloranfenicol (antibiótico). En la Unión Europea, por el momento, no se ha fijado límites máximos en el agua potable y no es necesario el seguimiento de tales compuestos, sin embargo, lo más probable es que en un futuro próximo sean regulados.

Actualmente en Europa hay más de 3000 ingredientes activos permitidos para su uso en el cuidado de la salud. Sin embargo, desde que se detectara el primer residuo de ácido clofíbrico hasta el momento, únicamente unos 100 de ellos han sido alguna vez analizados en diferentes compartimentos medioambientales. En virtud de lo anterior, es necesario seguir trabajando en esta línea de investigación, en la que se debe incluir el estudio de los metabolitos y los productos de transformación (Miao XS et al., 2005; Bedner M, Maccrehan W A, 2006).

El gran número de ingredientes activos existentes demanda incluir dentro de la investigación el estudio de los metabolitos y los productos de transformación.

Por el momento el número de artículos dedicados al análisis de fármacos en aguas es muy superior al del análisis en matrices sólidas (Díaz-Cruz S et al., 2003; Díaz-Cruz M. S., Barceló D., 2005; Hernando M. D. et al., 2006 a).

Los grupos de fármacos que en la actualidad se consideran más peligrosos y demandan investigación son: antibióticos, citostáticos y estrógenos.

Los antibióticos, por la posibilidad de que se desarrollen cepas bacterianas resistentes que hagan que estos compuestos resulten ineficaces para el fin para el que fueron diseñados (Díaz-Cruz S et al., 2003) (los antibióticos ocupan el 3er puesto en volumen de uso de todos los fármacos empleados en medicina humana, y el 70% de los empleados en medicina veterinaria).

Los medios de contraste en rayos X, porque son muy persistentes, no resultan eliminados en las plantas de tratamiento, y alcanzan fácilmente las aguas subterráneas por percolación a través de suelos

Los citostáticos, porque debido a su gran potencia farmacológica exhiben con frecuencia propiedades carcinogénicas, mutagénicas, o embriogénicas, y, al igual que los anteriores, parece presentar una eliminación despreciable en los procesos de tratamiento.

Los estrógenos, utilizados fundamentalmente como anticonceptivos y para el tratamiento de desórdenes hormonales tan frecuentes como la menopausia, que son los responsables en muchos casos de la aparición de fenómenos de feminización, hermafroditismo, y disminución de la fertilidad.

3.1.2. Retardantes de llama bromados

Los retardantes de llama bromados son un tipo de productos químicos industriales tóxicos que se añaden habitualmente a productos de consumo tales como ropa, muebles y productos electrónicos para reducir los daños y heridas causados por el fuego. Algunos de estos productos de consumo se muestran en las figuras 3.4. y 3.5.



Figura 3.4. Aumento en el desecho y elaboración de nuevos productos electrónicos.

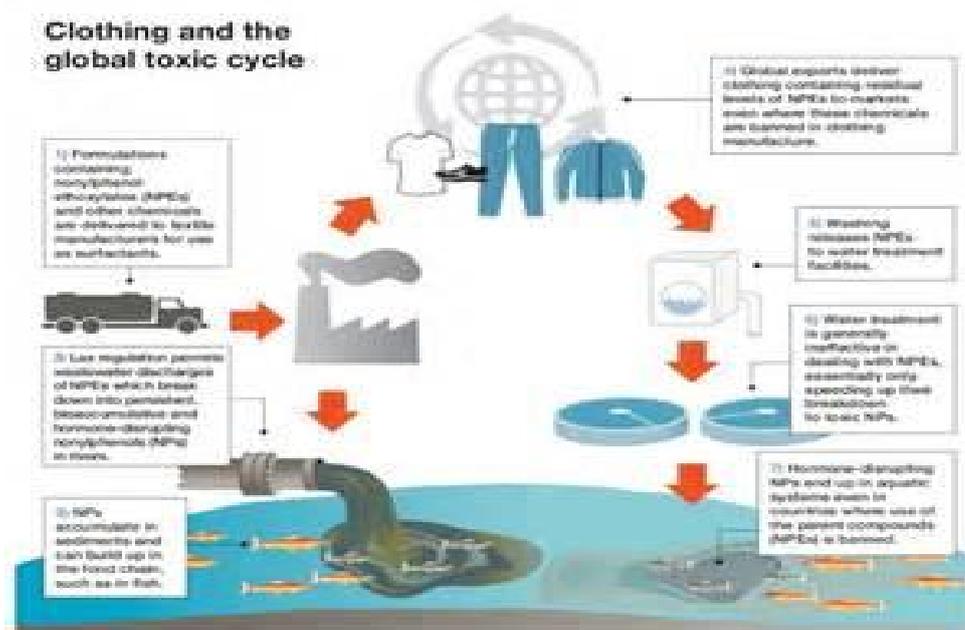


Figura 3.5. Uso de retardantes de llama bromados en algunos productos de uso diario.

La industria norteamericana es el mayor usuario en todo el planeta; sin embargo, una parte importante de los productos fabricados en América del Norte están destinados al mercado internacional. Dentro de los EE.UU. y en todo el mundo, la industria electrónica es la que más consume estos retardantes. En las computadoras se utilizan en placas de circuito impreso, en componentes tales como conectores, cubiertas de plástico y cables, también en cubiertas de plástico para televisores, alfombras, pinturas, tapicerías y electrodomésticos.

La producción de retardantes de llama a nivel mundial es de 200,000 ton/año de las cuales cerca de 47,000 corresponden a los polibromodifeniléteres (Birnbbaum LS, Staskal DF, 2004)

La preocupación por estos compuestos radica básicamente en su gran ubicuidad, ya que se han detectado en un amplio número de muestras tanto humanas como animales y medioambientales, y además, en áreas alejadas de las zonas de mayor producción y uso (Meironyte D. et al. 1999; Norenk, Meironyte D. y Noren K., 2000; Bergman A. Birnbbaum L. S., Staskal DF, 2004; Alae M., 2003). Esta circunstancia, su persistencia, biodisponibilidad, y algunos indicios sobre posibles efectos adversos, no completamente demostrados, como neurotoxicidad, disrupción endocrina y cáncer, han motivado la aplicación del principio de precaución y la consiguiente adopción de medidas legislativas para su control en agua a nivel europeo.

Para su análisis, se han empleado diversos métodos, todos ellos basados en la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, de los cuales el método de dilución isotópica en combinación con espectrometría de masas de alta resolución es el indicado como método de elección (Alaee M., 2003; Cavaci A. et al., 2003). La dificultad de su análisis radica, sobre todo, en el hecho de que existen un gran número de congéneres de polibromodifeniléteres diferentes (209 en total) con diferentes estructuras y propiedades. Las principales cuestiones que esperan respuesta en relación con estos compuestos son cómo y dónde se liberan al medio ambiente, las vías de exposición, el destino que siguen en el medio ambiente, y evidencias firmes sobre su posible impacto y efectos. Estudios realizados previamente por el equipo investigador del Dr. Barceló han demostrado la presencia de estos compuestos en sedimentos y peces de ríos españoles (Eljarrat E. et al., 2004; Eljarrat et al., 2005; Labandeira A. et al., 2006).

3.1.3 Parafinas cloradas

Las parafinas cloradas son formulaciones industriales consistentes en mezclas técnicas de alcanos de cadena lineal policlorados, con cadenas hidrocarbonadas (H C) que varían entre 10 y 30 átomos de carbono (C), y porcentajes de cloro comprendidos entre 30 y 70%. Las mezclas comerciales se dividen según la longitud de la cadena H C en parafinas cloradas de cadena corta, con 10 a 13 átomos de C, de cadena media, con 14 a 17 átomos de C, y de cadena larga, con 18 a 30 átomos de C. Estas formulaciones industriales, que están formadas por mezclas complejas de un gran número de sustancias isoméricas, se caracterizan por presentar una baja presión de vapor, una viscosidad alta y propiedades como retardantes de llama y estabilizantes químicos, propiedades que se han explotado en su empleo fundamentalmente como aditivos en fluidos de corte y lubricantes usados en carpintería metálica y en la industria automovilística, y como plastificantes en materiales de PVC, en pinturas, adhesivos, etc.

La producción mundial de las aproximadamente 200 formulaciones comerciales que existen se estima en unas 300,000 ton/año, y de ellas las más utilizadas, y también las más tóxicas, han sido las de cadena corta (United Nations Environmental Programme. Environmental Health Criteria 181). Estas sustancias han sido calificadas como muy tóxicas para los organismos acuáticos, se ha observado bioacumulaciones en algunas especies, son persistentes, se han encontrado en material biológico procedente del

ártico, lo que indica que pueden ser transportadas a grandes distancias, y presentan una degradación lenta (tanto química como biológica).

A la vista de los informes científicos sobre sus riesgos, estas sustancias se han incluido en la lista de sustancias prioritarias en el agua de la U E, y se han puesto limitaciones a su comercialización y uso.

En EE.UU, por el contrario, no se han fijado límites para estos compuestos, a pesar de que las parafinas con una media de 12 átomos de carbono en su cadena y un grado de cloración del 60%, han sido catalogadas por la Agencia para Investigación del Cáncer como posibles carcinógenos humanos (cáncer de hígado, renal, de la tiroides y en ratas).

Las parafinas cloradas no tienen un origen natural conocido y, por tanto, los niveles presentes en el medio ambiente son un resultado de su producción y uso (desecho inadecuado de productos y residuos o lixiviados de polímeros, pinturas, etc.). Debido a su baja volatilidad y solubilidad en agua, y a su carácter lipofílico, presentan una fuerte tendencia a adsorberse en sedimentos en donde se observan las concentraciones más altas, sobre todo en áreas próximas a zonas de producción, y también a bioacumularse, habiéndose encontrado en aves, peces, mamíferos, etc., a niveles de hasta 12mg/kg. En humanos, también se ha detectado su presencia en diferentes órganos con concentraciones de hasta 190 Mg/kg en tejido adiposo, mientras que en aguas (en donde pueden estar presentes mayormente adsorbidos a la materia particulada) los niveles son mucho más bajos, de pocos Mg/L, y concentraciones igualmente bajas han sido detectadas en los escasos estudios llevados a cabo hasta ahora en la atmósfera.

El análisis de las parafinas cloradas presenta una gran dificultad debido, por un lado, a la extrema complejidad de las mezclas, que contienen miles de congéneres individuales y con una gran variedad de propiedades físico-químicas, y por otro, a la escasez de patrones individuales(Eljarrat, Barceló D., 2006). Estas circunstancias hacen que su análisis requiera el empleo de procedimientos de purificación exhaustivos y técnicas de análisis selectivas, de las cuales la más utilizada es la espectrometría de masas en modo de ionización negativa.

No obstante, hasta ahora no se han obtenido datos acerca de las concentraciones exactas de los compuestos individuales.

3.1.4 Pesticidas polares y metabolitos

Los pesticidas, en especial los más apolares, debido a la regulación de que han sido objeto, se han estudiado durante décadas y en consecuencia se tiene un razonable conocimiento sobre su presencia y destino en el medio ambiente acuático. Sin embargo, en los últimos años, la preocupación en torno a estos compuestos se centra en los productos de degradación, que han sido en su mayor parte ignorados hasta la fecha y que, sin embargo, se ha visto que pueden ser más ubicuos y tóxicos que los compuestos a partir de los cuales se generan. La mayoría de los productos de degradación de pesticidas son compuestos polares, muchos de ellos quirales, para cuya determinación la técnica más idónea es la de cromatografía de líquidos – espectrometría de masas en tándem (L C- M S/M S) (Geerdink R B et al., 2002).

Algunos de ellos, como los productos de degradación del DCPA (monoácido y diácido), del alacloro (ácido sulfónico), y de otras acetilidas y triazinas han sido incluidos en la lista de contaminantes candidatos (Contaminants Candidate List, CCL) de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA), y se encuentran entre las líneas de investigación de numerosos grupos científicos a nivel internacional (Mallat E, Barceló D., 1998; Santos TCR et al., 1998).

3.1.5 Compuestos perfluorados

Los detergentes perfluorados son un claro ejemplo de compuestos de uso industrial que han sido utilizados durante décadas en un amplio número de sectores, y que ahora se descubren como contaminantes muy peligrosos y ampliamente distribuidos en el medio ambiente. En el centro de investigaciones y la polémica que rodea a estos compuestos se sitúan el perfluorooctano sulfonato o PFOS y el ácido perfluorooctanoico o PFOA.

El perfluorooctano sulfonato se ha usado como refrigerante, detergente, y polímero, en preparados farmacéuticos, retardantes de llama, lubricantes, adhesivos, cosméticos, insecticidas, etc. El PFOA, por su parte, se utiliza en su fabricación de fluoropolímeros (PTFE) y fluoroelastómeros (PVDF) empleados en una gran variedad de productos comerciales como tejidos, alfombras, recipientes alimentarios, y automóviles. Ambos compuestos, según estudios recientes, son tóxicos y persistentes, el PFOA es además carcinogénico, y el PFOS presenta una fuerte tendencia a la bioacumulación (Shultz M. M. et al., 2003).

A raíz de diversas investigaciones llevadas a cabo por 3M, el principal productor de estos compuestos en EE.UU., y por la EPA, 3M acordó cesar la producción de este compuesto en el año 2000, pero la polémica en torno a este compuesto, el PFOA, y los surfactantes fluorados en general no ha terminado.

Estos compuestos se han detectado en sangre e hígado humanos (a elevadas concentraciones, de hasta Mg/mL de sangre en estudios ocupacionales), en hígado y grasa de animales, y en aguas superficiales y subterráneas (Villagrasa M. et al., 2006).

Para su análisis se han empleado distintas técnicas como la resonancia nuclear (RMN), GC-MS y LC-MS, de las cuales LC- tándem MS con ionización por electrospray es considerada como la más adecuada. Los aspectos que requieren una investigación más urgente son el estudio de las fuentes de entrada en el medio ambiente y las vías de exposición en humanos, los niveles en agua, aire, suelos, sedimentos y biota, su destino en el medio ambiente, y datos sobre su degradación química (Villagrasa M. et al., 2006). En opinión de algunos científicos los problemas ambientales asociados a estos compuestos pueden alcanzar dimensiones comparables a los provocados por los DDT, PCBs, dioxinas y otros compuestos.

3.1.6 Las drogas de abuso

El estudio de las drogas de abuso tiene un doble objetivo: por un lado, determinar la presencia, el destino y los posibles efectos de las drogas más consumidas y sus principales metabolitos en el medio ambiente acuático, y por otro, estimar a partir de los datos ambientales obtenidos en aguas superficiales o residuales el consumo de drogas en las áreas investigadas. Este tipo de estudios, de los cuales solo existen unos cuantos precedentes en el mundo (Petrovic M. et al., 2008), son importantes, primero, porque según el World Drug Report 2006 de la Oficina contra la Droga y Delito de las Naciones Unidas, España es tras EE. UU. el país con una mayor prevalencia de consumo de cocaína, y segundo, porque este tipo de estudios podrían ser una alternativa más rápida, económica y fiable que los indicadores que se utilizan en la actualidad para evaluar el consumo de drogas basados en encuestas, estadísticas criminales, médicas, etc.

3.2 Identificación de impactos en el ambiente

3.2.1 Calidad del agua

Una inmensidad de compuestos químicos está presente en el agua, sin importar la "pureza del agua". Esto último es un concepto que confunde, ya que simplemente es una reflexión sobre los tipos y las concentraciones de esos productos químicos

(acotados por una normatividad que depende del propio uso del agua). El número de contaminantes químicos a niveles de trazas puede exceder a aquellos presentes en concentraciones altas y que están normados.

Según las propiedades físico-químicas de los fármacos y sus metabolitos y productos de degradación, y las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a alcanzar las aguas subterráneas y contaminar los acuíferos o bien quedar retenidas en el suelo y acumularse pudiendo afectar al ecosistema y a los humanos a través de la cadena trófica. En consecuencia, para una evaluación realista del medio acuático es necesario un estudio integrado agua subterránea-suelo/sedimento-agua superficial-suelo. Los fármacos que se han detectado en el medio ambiente acuático, ya sea directamente o sus metabolitos, incluyen analgésicos/antiinflamatorios, antibióticos, antiepilépticos, reguladores de lípidos, medios de contraste en rayos X, esteroides, anticonceptivos orales, etc. (Hernando, M.D. y col., 2006^a). Las concentraciones a las que se han encontrado en aguas superficiales (como consecuencia de una eliminación incompleta en las plantas de tratamiento de aguas) o en aguas subterráneas (debido a la escasa atenuación que experimentan algunos compuestos durante la filtración a través de suelos) se sitúan normalmente en el rango de ng/L, o mg/L, mientras que en suelos y sedimentos, en donde pueden persistir durante largos periodos de tiempo (la vida media del ácido clofibrico, por ejemplo, se estima en 21 años), alcanzan concentraciones de hasta g/kg (Hernando M.D. y col., 2006^a; Diaz-Cruz, M.S., Barceló, D., 2005). Pero lo que ha despertado una mayor preocupación ha sido el hallazgo de algunos de ellos (como el ibuprofeno, el diclofenaco, la carbamazepina, o el ácido clofibrico) en aguas para consumo humano (Bedner, M., Maccreehan, W.A., 2006).

La química analítica juega un papel preponderante ante los contaminantes, debido al aumento de los tipos de productos químicos que pueden ser detectados, y los límites de detección que son cada vez más bajos. También, gracias a la química analítica es posible ampliar y refinar nuestra perspectiva en relación con la “pureza del agua”.

3.2.2 Ecosistema

Los contaminantes antropogénicos (productos químicos sintetizados o indirectamente producidos por las actividades humanas) se han dispersado ampliamente en el ambiente y están presentes en las aguas superficiales y subterráneas, como resultado de emisiones industriales, la ineficiente disposición de residuos sólidos (por ejemplo la incineración y los tiraderos de basura), los derrames accidentales, la aplicación

controlada (pesticidas en la agricultura, recarga artificial del agua subterránea, disposición en el suelo de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales) y las actividades de consumo (que incluye la excreción y la disposición natural de una amplia gama de productos químicos, tales como los PPCPs). Las actividades de consumo se reconocieron recientemente como una fuente potencialmente importante de contaminación, dispersa no controlada.

Mientras que el universo “conocido” de productos químicos orgánicos puede parecer grande, el universo de productos químicos orgánicos “potenciales” (aquellos que es posible sintetizar y aquellos que existen pero que no han sido identificados todavía) es inimaginablemente grande. Para tener una idea del número de entidades químicas orgánicas distintas, que se podría hipotéticamente sintetizar e incluir en el universo químico conocido, si se considera el cálculo propuesto por Bohacek et al., (1996), estaría sobre 10 a la 60 estructuras distintas, que son posibles con un total de simplemente 30 átomos de carbono, nitrógeno, oxígeno o azufre, esto sin considerar el espectro posible si incluimos a los halógenos y el fósforo. Claramente se observa que no hay límites para los posibles tipos de productos químicos orgánicos.

El alto potencial en la proliferación continua de fármacos y productos de uso personal, medicamentos veterinarios, y de otros productos químicos antropogénicos, plantea desafíos sustanciales y quizá insuperables para su regulación y control, desde el punto de vista de su evolución y el diseño de sistemas viables para su aplicación. Por otra parte, la investigación y el desarrollo de drogas y compuestos bioactivos evoluciona rápidamente y, en muchos casos, los mecanismos de acción son nuevos para los sistemas biológicos, por lo que las consecuencias en el ambiente son inciertas.

Por estos motivos la información disponible sobre los impactos potenciales de muchas de esas sustancias es limitada, aunque hay evidencias de que algunas de ellas causan efectos adversos en la salud humana y el ambiente. En algunos casos, como los pesticidas y los productos de transformación, son potencialmente más tóxicos que el compuesto original. También se debe considerar que la exposición prolongada a los antibióticos puede contribuir al desarrollo de resistencia por algunas especies de bacterias.

Si tomamos una muestra desconocida del ambiente (agua, suelo o aire incluso), una porción considerable de sus componentes orgánicos no podrá ser identificada, debido a limitaciones analíticas, ya que en la mayoría de los casos no está disponible el estándar para comparar el compuesto puro con el que se encuentra en la muestra. En este caso la toxicidad se puede asociar con los compuestos que es posible identificar y analizar (analitos), así como con los compuestos que permanecen en la muestra, pero que por limitaciones del análisis químico no es posible identificar.

Algunos de los efectos conocidos causados por contaminantes emergentes son:

El diclofenaco afecta a los tejidos de las branquias y de riñones en peces de agua dulce (Hoeger et al., 2005)

El pesticida Dicloro-difenil-ticloroetano (DDT) ha causado efectos hormonales provocando adelgazamiento en la cáscara de huevo de diferentes especies.

3.2.3 Salud pública

Algunos de los efectos de los contaminantes emergentes que afectan a la salud pública son:

Actúa como un anti andrógeno causando efectos secundarios feminizadores en hombres (Sohoni et al., 1998)

Aumento en el riesgo de cáncer de mama en humanos (krisnan et al., 1993)

Los ftalatos o ésteres de ftalato utilizados como pesticidas en plásticos como PVC, han provocado complicaciones en embarazos (I E H, 2005).

Aunque los resultados han sido un poco inconsistentes, algunos estudios epidemiológicos sugieren que puede existir una asociación entre la exposición de los DSP (residuos de desinfectantes y sus subproductos) y mayor riesgo de resultados adversos del desarrollo, incluyendo bajo peso al nacer, retraso del crecimiento intrauterino (11,12), defectos congénitos tales como tubo neural, cardiovascular (13) y aborto espontáneo (14). Debido a que el conjunto epidemiológico de estos contaminantes necesariamente no es una casualidad, es necesario realizar estudios de toxicidad de cada subproducto en forma individual para poder determinar la forma de desinfección del conjunto total.

Daños en la función reproductiva en el hombre y cambios de comportamiento en humanos (Colborn et al., 1995).

El pesticida Penconazol es un fungicida que puede afectar la tiroides, próstata y tamaño de testículos (Mckinney et al., 1994).

Antibióticos como penicilina, sulfonamidas y tetraciclinas causan resistencia en patógenos bacterianos (Witte et al., 1998).

3.3 Evaluación de impactos en el ambiente

3.3.1. Metodología aplicada

Para estructurar la matriz de impacto ambiental es necesario considerar los contaminantes emergentes de acuerdo a la clasificación considerada en 3.1 y evaluarlos sobre los elementos y características ambientales susceptibles de ser impactados, para lo cual se utilizarán las siguientes definiciones (Garmendia, 2004)

Efecto beneficioso (+): referido a la relación costo-beneficio que se genera al producir y/o utilizar determinado elemento.

Efecto perjudicial (-): aumento de los perjuicios derivados de la contaminación.

Persistencia temporal: supone una alteración definida en el tiempo de factores predominantes en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar.

Persistencia permanente: supone una alteración indefinida en el tiempo de factores ambientales predominantes en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar.

Extensión puntual: referida a una zona específica con corta amplitud en la que pudieran producirse efectos colaterales.

Extensión parcial: referida a una zona que abarca una mayor amplitud que la extensión puntual.

Extensiva: referida a una zona indefinida por su mayor prolongación en cuanto a los efectos producidos.

Efecto recuperable: aquel en que la alteración puede eliminarse, ya sea por la acción natural o bien por la acción humana.

Efecto irrecuperable: aquel en que la alteración es imposible de reparar tanto por la acción natural como por la humana.

Efecto simple: el que acciona sobre un solo componente ambiental.

Efecto acumulativo: el que al prolongarse en el tiempo, intensifica su gravedad.

Efecto sinérgico: el que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente.

Efecto reversible: aquel en el que la alteración que supone puede ser asimilada por el entorno a mediano plazo (5 años), debido al funcionamiento de los procesos naturales y de los mecanismos de autodepuración del medio.

Efecto irreversible: el que supone la imposibilidad, de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.

Intensidad baja: aquella en la que los efectos que actúan sobre los ecosistemas y la salud son intrascendentes.

Intensidad media: aquella en la que los efectos que actúan sobre los ecosistemas y la salud producen algunos daños.

Intensidad alta: aquella en la que los efectos que actúan sobre los ecosistemas y la salud producen daños considerables.

Se utilizará la tabla 3.1 que contiene los valores asignados a las características de cada impacto para aplicar la expresión:

$$I_m = \pm (A + E + I_n + P + R_v + R_c)$$

Donde:

A = Acumulación

E = Extensión

I_n = Intensidad

P = Persistencia

R_v = Reversibilidad

R_c = Recuperabilidad

Para estimar la importancia, se deberá normalizar la expresión, obteniendo:

$$I_n = \pm (|I_m| - \text{Mínimo}) / (\text{Máximo} - \text{Mínimo})$$

Donde Mínimo es el mínimo valor, en valor absoluto, que se pueda alcanzar con la expresión y Máximo es también el máximo valor en valor absoluto.

Tabla 3.1

Valoración cualitativa

Signo		Acumulación (A)	
+	Impacto beneficioso	1	Simple
-	Impacto perjudicial	3	Acumulativo
		5	Sinérgico
Extensión (E) Área de influencia		Intensidad (In) Grado de destrucción	
1	Puntual	1	Baja
2	Parcial		
3	Extenso	4	Media
		8	Alta
Persistencia (P) Permanencia del efecto		Reversibilidad (Rv) Medios naturales	
1	Temporal	1	Reversible
3	Permanente	3	Irreversible
Recuperabilidad (Rc) Medios humanos			
1	Recuperable		
3	Irrecuperable		

Contaminantes emergentes		A. Fármacos				D. Pesticidas polares				G. Metabolitos y/o productos de degradación de las clases de sustancias anteriores.																	
		B. Retardantes de llama bromados				E. Compuestos perflorados				F. Drogas de abuso																	
		C. Cloroalcanos																									
Elementos y características ambientales susceptibles de ser impactados	CARACTERISTICAS DE LOS IMPACTOS													FACTOR PONDERADO	Im (Valor de importancia)	In (Valor normalizado)	Producto de Calidad Ambiental	Medida de mitigación		EVALUACION				Obras o actividades que generan el impacto			
	Signo	Persist.	Extension	Recuperab	Acumulacion	Reversib.	Intensidad	SI		NO		COMPATIBLE	MODERADO					SEVERO	CRITICO								
	BENEFICIOSO	PERJUDICIAL	TEMPORAL	PERMANENTE	PUNTUAL	PARCIAL	EXTENSO	RECUPERABLE	IRRECUPERABLE	SIMPLE	ACUMULATIVO	SINERGICO	REVERSIBLE					IRREVERSIBLE	BAJA	MEDIA	ALTA						
Ecosistema	Suelo	-	1			2	1			3		1	1			25	9	0.16	3.95	X		X				(A,B)	
	Sedimentos	-	1			2	1			3		1			8	50	16	0.53	26.32	X		X				(B,C,D)	
	Agua subterránea	-	1				3	1		3		1	1		75	10	0.21	15.79	X		X				(A,B,E)		
	Agua superficial	-	1				3	1		3		1		4	100	13	0.37	36.84	X		X				(A,B,D,E)		
	Flora		1							3		1			8	75	13	0.37	27.63			X				(B,C)	
	Fauna terr.	-	1			2	1			3			3		8	75	18	0.63	47.37	X		X		X		(A,B,C,D,E)	
	Fitoplancton	-	1				3	1		3		1		4	100	13	0.37	36.84									
	Zooplancton	-	1				3	1		3		1		4	75	13	0.37	27.63	X				X			(A)	
	Necton	-		3			3	1		3		1		4	75	15	0.47	35.53	X					X		(A,B,C,D)	
	Org. Béntico	-					3	1		3		1		4	50	12	0.32	15.79	X				X			(A)	
Salud	Hombres	-				1			3	3				4	80	11	0.26	21.05	X							(A,B,C,D,E)	
	Mujeres	-				1			3	3		3		4	80	14	0.42	33.68	X							(A,B,C,D,E)	
	Agua para consumo humano	-	1				3	1		3		1	1		80	10	0.21	16.84	X			X				(A)	
	Agua residual	-		3			3	1		3		1		4	60	15	0.47	28.42	X				X			A,B,D,E,F,G	
		0	9	6	2	6	24	11	6	0	42	0	11	6	3	32	24	1000	182								

Tabla 3.2 Matriz de Impacto

En las columnas de efecto beneficioso y perjudicial es importante señalar que en algunos elementos se presentan tanto efectos benéficos como perjudiciales, ya que si bien muchos de estos productos fueron elaborados para beneficio de la salud y cuidado personal como los fármacos, también es importante señalar que los efectos causados en el medio ambiente también repercuten en la salud.

En la persistencia de los diferentes contaminantes solamente se le asignó el mayor valor en la columna de persistencia permanente al elemento necton y al agua residual, ya que por los estudios realizados en muestras de zonas polares se ha podido detectar la presencia de compuestos químicos, lo que muestra el impacto causado en el medio ambiente tanto en el tiempo como en el espacio.

En lo referente a la extensión de los diferentes contaminantes solamente se designó como puntual en la salud de hombres y mujeres ya que donde se producen los mayores efectos es en las zonas urbanas, que es la zona donde se concentra la mayor parte de la población mundial. Parcial para suelo, sedimentos y fauna terrestre por su porcentaje de concentración y extenso en aguas superficiales, subterráneas, fitoplancton, zooplancton, necton, organismos bénticos, agua para consumo humano y agua residual por su presencia en amplitud.

En la columna de efectos recuperables se consideraron todos como recuperables, excepto en la salud de hombres y mujeres ya que de acuerdo a estudios realizados, una vez que el sistema endocrino es afectado, los daños son irreversibles.

De las columnas de efectos simples, acumulativos y sinérgicos, se señaló a todos los elementos afectados como acumulativos ya que la tendencia de crecimiento urbano es exponencial y por lo tanto la demanda de servicios es proporcional al igual que la producción de nuevos compuestos químicos, que conllevan a una mayor acumulación de productos y subproductos.

En cuanto a los efectos reversibles se consideran todos los elementos excepto los de la salud, ya que hasta el momento de acuerdo a estudios realizados las posibilidades de cura son reducidas si se cumplen los indicios de que algunas enfermedades como el cáncer son causados por la presencia exposición de algunos compuestos químicos en el agua.

Respecto a la intensidad se consideró la mayoría de ellos como intensidad media, excepto en sedimentos, flora y fauna, donde se consideró la intensidad alta, ya que de acuerdo a estudios realizados se ha comprobado la muerte de algunas especies de aves y por ende la posible extinción de dichas especies.

3.3.2. Conclusión del análisis

Tomando como referencia a los 3 mayores valores de la columna de producto de calidad ambiental se observa que el mayor impacto se produce en la fauna terrestre, seguido del agua superficial y fitoplancton, que tienen los mismos valores, y enseguida la salud de las mujeres.

Capítulo IV

Medidas de mitigación

Como respuesta a las diferentes afectaciones que presentaron los elementos que integran la matriz de impacto ambiental, en este capítulo se incluyen las medidas preventivas y de control que se han propuesto para mitigar el impacto de los contaminantes emergentes.

4.1 Medidas preventivas

Para mejorar el uso racional de los medicamentos, la OMS:

Efectúa un seguimiento del uso mundial de los medicamentos y de las políticas farmacéuticas.

Proporciona orientaciones de política y apoya a los países para que hagan un seguimiento del uso de los medicamentos y formulen, apliquen y evalúen estrategias nacionales para fomentar el uso racional de los medicamentos.

Elabora e imparte programas de capacitación para los profesionales sanitarios nacionales acerca del seguimiento del uso de los medicamentos y su mejoramiento en todos los niveles del sistema de salud.

La estrategia más eficaz para mejorar el uso de los medicamentos en la atención primaria en los países en desarrollo consiste en una combinación de la formación y la supervisión del personal sanitario, la educación de los consumidores y el suministro de los medicamentos apropiados en cantidades suficientes. Separadamente, todas estas intervenciones tienen un impacto reducido.

Plan integral de fomento sanitario para el manejo adecuado de los medicamentos caducos.

Este plan de acción, es fundamental para reducir la cantidad de fármacos caducos en las farmacias, aumentar la recolección y la destrucción de los mismos en hornos especializados de gestión ambiental.

En una acción de corresponsabilidad, los fabricantes de medicamentos se comprometen por escrito a recibir devoluciones de productos caducos de los distribuidores y a destruirlos conforme a la normatividad.

A su vez, los distribuidores se comprometieron a recibir en tiempo y forma las medicinas caducas provenientes de las farmacias y a remitirlas a los laboratorios.

La Comisión Nacional de la Industria Farmacéutica (Canifarma) planea una estrategia para recoger los medicamentos que caducan en los hogares a través de la instalación de contenedores en las farmacias.

4.2 Medidas de control

Históricamente las plantas de tratamiento de aguas residuales han sido diseñadas para la eliminación de materias orgánicas y contaminantes especificados en las normas oficiales mexicanas. No obstante, en lo referente al estudio de nuevos contaminantes como los emergentes, los cuales poseen una gran variedad de propiedades químicas, se requiere de tratamientos avanzados para una segura incorporación de las aguas residuales al medio ambiente.

4.2.1 Tratamientos fisicoquímicos

No se logra obtener una remoción significativa (< 20%) con tratamientos fisicoquímicos como coagulación, flotación ni suavización con cal, sin embargo, con carbón activado granular y oxidación por ozono y cloración sí se han obtenido buenos resultados (>90%), (Westerhoff et al. 2005).

Los estudios realizados han mostrado que la coagulación no es eficiente para la eliminación de diclofenaco, carbamazepina, ibuprofeno y ketoprofeno (Petrovic et al. 2003; Vieno et al. 2006).

4.2.2 Procesos biológicos

Tratamientos convencionales como sistemas de lodos activados o filtros biológicos percoladores pueden rápidamente convertir diversos compuestos orgánicos en biomasa que, posteriormente por medio de clarificadores, pueden ser separados. Sin embargo, no sucede lo mismo con moléculas como los emergentes. En un agua residual de una planta de tratamiento en Suiza se encontraron compuestos como carbamazepina, naproxen y diclofenaco, con una eficiencia de remoción de 7%, 45% y 69% respectivamente (Tixier et al. 2003).

4.2.3 Procesos avanzados

Los tratamientos biológicos son considerados como la tecnología más adecuada en el tratamiento de aguas residuales, pero solo remueven parcialmente los contaminantes emergentes, los cuales en la mayoría son descargados en los efluentes de las plantas de tratamiento. Por esta razón se busca tecnología más eficiente no solo para el tratamiento de aguas residuales, sino también para el agua de consumo.

Se han utilizado procesos de oxidación avanzada como ozono con peróxido de hidrógeno para tratar ibuprofeno y diclofenaco, con lo que se ha logrado eliminar hasta 90% de estos compuestos.

También ha sido eliminada por completo la carbamazepina por un sistema solar combinado de fotocátalisis (Andreozzi et al., 2002)

4.2.4 Tratamientos combinados

Estos tratamientos se consideran como una opción ya que su alto costo no compite ante el costo de procesos biológicos, sin embargo, el uso de un proceso avanzado utilizándolo como pre-tratamiento o post-tratamiento puede mejorar la biodegradabilidad de aguas residuales o lograr una casi completa remoción, respectivamente.

La combinación de procesos de oxidación con biológicos reflejan un gran potencial ante el problema del tratamiento de aguas contaminadas difíciles o imposibles de remover por procesos convencionales físico-químicos/biológicos y con el objetivo de reutilizar esa agua y contribuir con el cuidado medioambiental (Gogate y Pandit, 2004; Mantzavinos y Psillakis, 2004).

Para el tratamiento de penicilina se ha practicado la ozonación y perozonación ($O_3+H_2O_2$) a diferentes concentraciones antes de someter un efluente a un tratamiento biológico de lodos activados, el resultado de esta investigación ha sido la remoción del 83% de DQO no biodegradable (Arslan et al., 2004). De igual forma se realizó un tratamiento satisfactorio de sustancias estrógenas en un proceso combinado de ozonación y reactor de lecho móvil después de haberse sometido a un tratamiento convencional de lodos activados (Gunnarsson et al. 2009).

Una mezcla de 5 pesticidas: metomil, dimetoato, oxamil, cimoxalin y pirimetanil fue mineralizada en un sistema combinado de oxidación avanzada y biológico. Se utilizó un sistema solar de oxidación por fotocátalisis con TiO_2 y foto-fenton en reactores parabólicos compuestos para alcanzar la biodegradabilidad de un agua residual en un reactor de biomasa inmovilizada (IBR), aquí se logró una mineralización de más del 90% de cada pesticida y una completa nitrificación (Oller et al., 2007). Recientemente se ha integrado a nivel laboratorio un MBR y un fotorreactor con TiO_2 para degradar carbamazepina (CBZ) en donde la mayor parte de la demanda (DQO) fue eliminada por el MBR y la oxidación fotocatalítica fue capaz de degradar por completo el CBZ (Laera et al., 2011).

La desinfección fotocatalítica ha conseguido la inactivación de especies como E. coli y permite la eliminación de los contaminantes químicos emergentes residuales no eliminados completamente en el tratamiento biológico previo.

La desinfección fotocatalítica ofrece ventajas frente a otras técnicas de desinfección (ozonización, cloración) como la baja toxicidad y bajo costo.

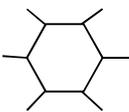
Figura 4.1 (Grupo de Ingeniería Química y Ambiental URJC)

Uso de enzimas

El uso de enzimas es útil para catalizar la oxidación de compuestos contaminantes de familias aromáticas como los plaguicidas organofosforados, colorantes tipo azo, plaguicidas organoclorados y organofosforados, hidrocarburos policíclicos aromáticos y compuestos azufrados del petróleo, entre otros (Torres y Ayala, 2010). Las reacciones son realmente rápidas, con tiempos alrededor de 2 a 10 minutos para una completa conversión en concentraciones de partes por millón o incluso partes por billón.

En la tabla 4.1. se ilustran algunas de estas reacciones.

Tabla 4.1. Reacciones catalizadas por peroxidasas y lacasas para algunos contaminantes aromáticos

Compuesto		Producto
Pireno (carcinógeno, mutagénico)		1, 8 – Pirenodiona (no mutagénico ni Carcinógeno)
Azul de mexilon (metabolitos mutagénico)		Producto hidrolizado, sin carácter mutagénico
Pentaclorofenol		Tetraclorobenzoquinona, mas biodegradable
Dibenzotiofeno		Sulfoxido de dibenzotiofeno, mas biodegradable

Fuente: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Centro de Química-ICUAP

Las enzimas oxidativas como las lacasas y peroxidasas exhiben la capacidad de oxidar a estos contaminantes (Liorety col, 2010, Lioret y col, 2013). Por ejemplo, el triclosán (TCS), un agente antibacteriano y fungicida de gran uso como desinfectante en hospitales, hogares e industria, es oxidado enzimáticamente por la lacasa de *Ganoderma lucidum*, produciendo dímeros y trímeros del triclosán (Murugesan y col, 2010). Los estudios de toxicidad de estos productos revelaron que la oxidación mediada por esta enzima efectivamente redujo la toxicidad del triclosán, con una conversión final del 100% hacia productos no tóxicos o menos tóxicos (Murugesan, Chang, Kim, Jeon, Kim y Chang, 2010)

Otros compuestos farmacéuticos han sido completamente oxidados por lacasas de otras fuentes como la de *Myceliophthora thermophila* (Lioret, Eibes, Lu-Chau, Moreira, Feijoo y Lema, 2010). Entre estos compuestos se encuentran antiinflamatorios (diclofenaco y naproxeno) y estrógenos (estrona, 17 B-estradiol, 17 B etinilestradiol) (Lioret, Eibes, Moreira, Feijoo y Lema, 2013, Suzuki y col, 2003)

En relación a las peroxidasas, algunos estudios reportan la habilidad de estas enzimas de oxidar fármacos aromáticos. Wen et al (2009; 2010) (Wen y col, 2010, Wen y col, 2009) reportaron la oxidación de dos antibióticos abundantes, la tetraciclina y la oxitetraciclina, por extractos crudos de lignino peroxidasa del hongo *Phanerochaete chrysosporium*, con una conversión del 95% en 5 minutos. De este mismo hongo, la enzima manganeso peroxidasa tiene la capacidad de oxidar a las hormonas esteroideas 17B estradiol y el etinilestradiol con una conversión del 95% y una remoción del 80% de la actividad estrogénica.

En otro ejemplo, el bisfenol-A y el nonilfenol fueron oxidados por la lacasa de *Coriopsis gallica* (Torres-Duarte y col, 2012). De acuerdo con el reporte, la lacasa fue capaz de catalizar la transformación de estos compuestos, produciendo polímeros como productos de reacción. La actividad estrogénica que exhibían los compuestos desapareció al oxidarlos enzimáticamente. Como puede apreciarse, las enzimas oxidativas tienen potencial de ser aplicables como parte de los métodos de tratamiento ambiental novedoso dado las altas conversiones y la disminución importante de la toxicidad.

La capacidad de estas enzimas de transformar a los contaminantes emergentes puede utilizarse también con fines de detección y cuantificación, formando parte de biosensores analíticos. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), define a un biosensor como un dispositivo que comprende un elemento de reconocimiento biológico o derivado biológico que esté integrado o íntimamente relacionado con un transductor físico-químico.

4.2.5 Humedales artificiales

En muchos países, la disposición final de las aguas residuales se realiza solo en algunos casos con algún tratamiento; debido al alto costo que implican las tecnologías convencionales y avanzadas, o bien, a la falta de conciencia en cuanto al peligro que esto representa para la naturaleza y, por tanto, para la humanidad. Por ello, se hace necesaria la búsqueda de técnicas de bajo costo de inversión y bajo consumo energético que solucionen de forma óptima este problema. La tendencia de los años 70 en la construcción de instalaciones de depuración de aguas contaminadas para áreas metropolitanas ha sido hacia alternativas de concreto reforzado. Con la adversidad de los altos precios de la energía y de la mano de obra, estos sistemas han llegado a generar costos significativos para las comunidades que operan con ellos.

Como alternativa a las costosas técnicas convencionales de tratamiento de aguas residuales, los ingenieros han buscado otros caminos y se ha desarrollado una serie de sistemas basados en los mecanismos de depuración existentes en la naturaleza, denominados por esta causa "sistemas de tratamiento naturales". Estos sistemas requieren la misma cantidad de energía por cada kilogramo de contaminante degradado que las tecnologías convencionales, sin embargo, esta fuente es tomada de la naturaleza como energía solar, energía cinética del viento, la energía química acumulada en la biomasa y en el suelo, etc. Entre estos sistemas se encuentran las lagunas de oxidación, los filtros verdes, los humedales naturales y artificiales, etc. Todos estos no son más que ecosistemas en los que juegan un papel importante determinadas plantas y microorganismos, cuya acción biológica y eficiente simbiosis permiten la eliminación de las cantidades excesivas de contaminantes, materia orgánica, trazas de metales pesados y agentes patógenos presentes en las aguas residuales. En estos sistemas también se dan procesos físicos y químicos tales como la filtración, la sedimentación, la absorción, la foto oxidación, la fotosíntesis, etc. que contribuyen, en conjunto a su acción depuradora.

Una técnica abordada recientemente es la construcción de ecosistemas artificiales como tratamientos de agua residual. El agua residual ha sido tratada y reutilizada satisfactoriamente en agricultura, zonas verdes, etc., gracias al uso de estas técnicas. El cambio conceptual que han permitido estos procesos novedosos es abordar el tratamiento de aguas residuales como tratamiento de agua contaminada con producción de recursos útiles (agua y nutrientes de plantas), en lugar de una mera obligación de depuración.

El interés en la aplicación de sistemas naturales de tratamientos de aguas residuales reside en diferentes aspectos:

- * Utilidad de los sistemas naturales para depuración y almacenamiento de nutrientes.
- * En el caso de los humedales naturales, sus beneficios medioambientales, tanto por la aportación de vida salvaje, como por su estética que no rompe el paisaje.
- * La rápida subida de los costos de construcción y operación asociados a las instalaciones de tratamiento convencional.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.



Figura 4.1. Humedal artificial en CCH Sur.

En concreto, una alternativa importante son los humedales artificiales que se pueden definir como sistemas biológicos confinados mediante algún tipo de impermeabilización, que surgen a partir de la simulación de los mecanismos propios de los humedales naturales para la depuración de las aguas, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interactuar las aguas con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, dando lugar a la aparición de procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación biológica, fotosíntesis, foto oxidación y toma de nutrientes por parte de la vegetación y que tienen las siguientes características:

- Se basan en tratamientos físicos, químicos y biológicos naturales, que no requieren aporte extra de reactivos químicos.
- En lo que respecta a su funcionamiento como tratamiento biológico, se opera en condiciones anaerobias, facultativas y/o aerobias en las que el oxígeno se aporta de forma espontánea por transporte desde la atmósfera, lo que representa un ahorro importante de energía por prescindir de aireación con procedimientos mecánicos.
- Se requiere extensión de terreno superior a la de los sistemas convencionales dada la baja velocidad de degradación de la materia orgánica del agua, por lo que son más lentos.

Estas características hacen que los humedales artificiales sean idóneos en sistemas rurales, sin alcantarillado y por tanto sin conexión a estaciones de tratamiento, con grandes extensiones de terreno disponible (especialmente granjas o casas rurales), o también en algunas fincas industriales que generen efluentes de tipo orgánico y de elevada biodegradabilidad, como son las industrias agroalimentarias (como por ejemplo, lecherías y queserías), o también para la depuración de aguas ácidas de minas, aguas de coquerías, o de lluvia.

Los aspectos que han motivado el creciente interés por esta tecnología son los siguientes:

- Proporcionan un tratamiento eficaz, eliminando de las aguas residuales un amplio espectro de contaminantes: materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, metales pesados, etc.
- Sus costos de inversión, operación y mantenimiento son significativamente menores que los de los sistemas de tratamiento convencionales.
- Proporcionan un tratamiento secundario y/o terciario produciendo un agua reutilizable en muchos casos.
- El aporte de oxígeno es espontáneo.
- No generan lodos.

- Toleran las fluctuaciones de caudal o de carga contaminante.
- Contribuyen al desarrollo de vida salvaje y a la educación medioambiental.

A pesar de todas estas ventajas, se ha observado que:

- En países con clima templado durante el invierno disminuye la efectividad de depuración de estos sistemas, sobre todo en la eliminación de nitrógeno.
- La eliminación de fósforo es baja y disminuye con el tiempo.
- Requieren grandes extensiones de terreno para alcanzar resultados satisfactorios.
- No pueden ser alimentados directamente con aguas residuales de altas cargas orgánicas o de sólidos suspendidos que podrían provocar la obturación del lecho en poco tiempo.

4.2.5.1 Tipos de humedales artificiales

Se han desarrollado dos tipos de sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales:

1. Humedal artificial de flujo superficial (FS)
2. Humedal artificial de flujo subsuperficial (FSS). En el cual se pueden encontrar variantes: Flujo horizontal (FSSH), vertical (FSSV) y sistemas híbridos que pueden formarse mediante la combinación de estos flujos.

4.2.5.1.1 Sistemas de flujo superficial (FS)

Son embalses artificiales contruidos sobre un terreno, que contienen un elemento que confina el sistema y evita filtraciones, además de una capa de grava o arena para servir de soporte para las raíces de la vegetación y a través de los cuales circula agua residual (figura 4.2). El agua se encuentra expuesta a la atmósfera y la trayectoria del flujo es horizontal. Estos sistemas también se pueden diseñar con el objetivo de crear nuevos hábitats para la flora y la fauna o para mejorar las condiciones de humedales naturales próximos.

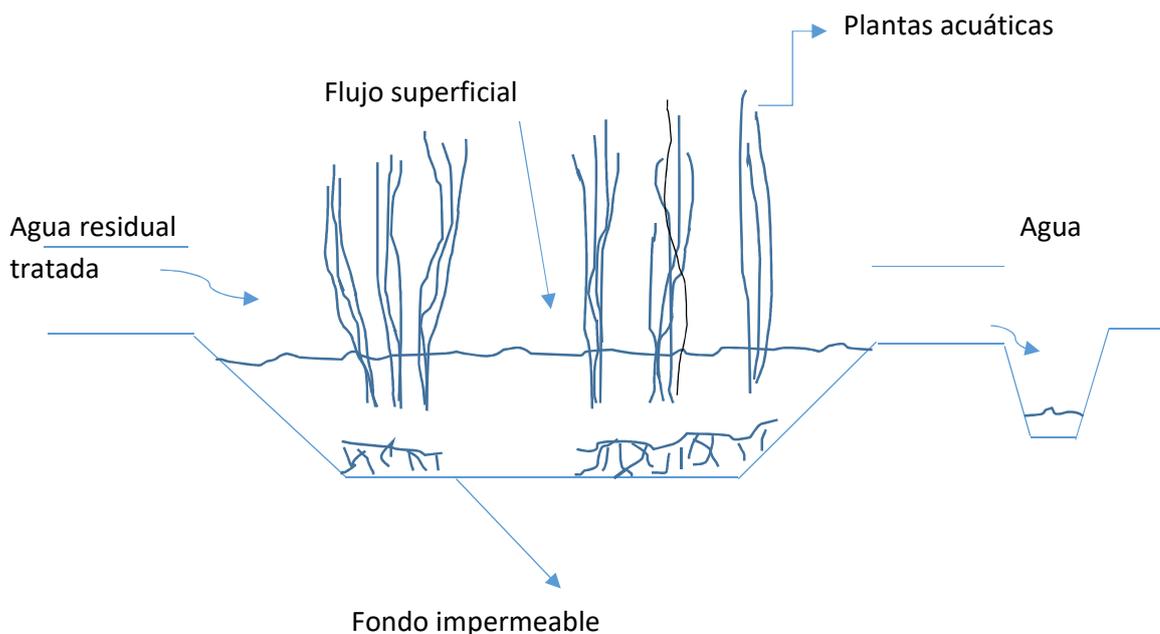


Figura 4.2 Humedal artificial de flujo superficial.

4.2.5.1.2 Sistema de flujo subsuperficial (FSS)

Al igual que un sistema de flujo superficial consiste en un canal o embalse impermeabilizado, que se encuentra relleno de un material sólido poroso que ocupa casi toda su profundidad. El agua residual circula a través del medio poroso y siempre por debajo de la superficie del mismo. Funcionan con vegetación emergente, cuya presencia es fundamental para su buen funcionamiento.

Para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales, la circulación del agua a través del suelo o material de soporte da muestras de ser más efectiva que la circulación de superficie. Con el paso del agua residual a través del lecho poroso, se produce un contacto con zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. La zona aerobia se encuentra en zonas muy cercanas a la superficie y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas.

Se forma una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas, originada por los microorganismos que degradan la materia orgánica. En consecuencia, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema. Esta situación presenta la ventaja de que el área requerida sea menor que en los humedales de flujo superficial pero con mayor costo debido al uso de una mayor cantidad de material ocupado por el medio poroso. Con este sistema, se evitan posibles plagas de insectos, olores y, en climas fríos, aportan mayor protección térmica.

Como se muestra en la figura 4.3, el nivel de agua es regulado con una tubería flexible manteniendo en todo momento el lecho saturado de agua.

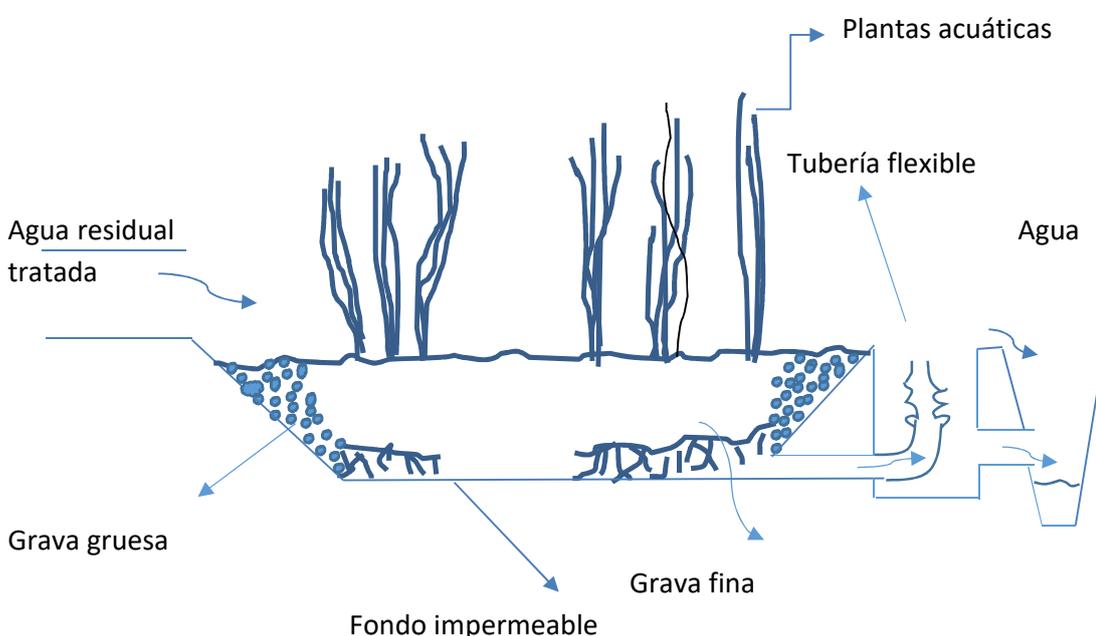


Figura 4.3 Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal

En los sistemas de flujo vertical, como se muestra en la figura 4.4 se consigue un mayor contacto entre el agua residual y el aire dentro de los poros, por lo tanto, se consiguen mejores rendimientos en aquellos mecanismos aerobios que tuvieron lugar debido a un mayor aporte de oxígeno. Presenta los inconvenientes de que su operación es más compleja, un poco más cara y que no han sido tan estudiados como los horizontales.

Desde el punto de vista de los costos, para que un sistema de flujo subsuperficial sea competitivo frente a uno de flujo superficial para pequeñas comunidades y caudales, dependerá del tipo de impermeabilización que se requiera y del tipo y disponibilidad del material granular empleado.

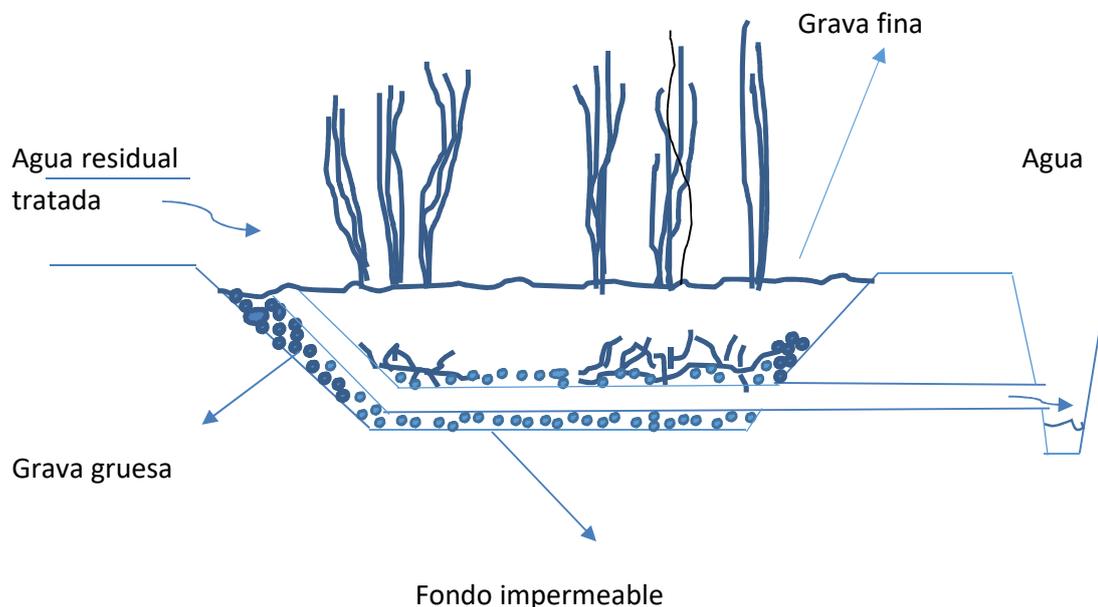


Figura 4.4 Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical

4.2.5.1.3 Componentes de un humedal artificial de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales están compuestos de agua, relleno sólido, plantas y otros componentes que aparecen de forma espontánea durante su uso como comunidades de microorganismos e invertebrados acuáticos.

Dentro del humedal la encargada del transporte de los contaminantes es el agua, y la que va a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración.

Las condiciones hidrológicas afectan a muchos factores abióticos, incluyendo el estado oxidativo del lecho, la salinidad y la disponibilidad de los nutrientes. Los factores abióticos, a su vez, determinan que seres vivos van a desarrollarse en el humedal. Finalmente, los componentes bióticos actúan alterando la hidrología y otras características fisicoquímicas del humedal.

El relleno, junto con los sedimentos y los restos de vegetación, actúan como estructura de soporte de las plantas y como superficie para el desarrollo de la masa microbiana. En esta función, cuanto más pequeño es el tamaño de la partícula, mayor cantidad de biopelícula albergará, aunque mayores probabilidades de obturación de los poros se producirán.

Las plantas contribuyen al tratamiento de agua residual de las siguientes formas: Distribuyen y ralentizan la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre la vegetación y el agua (Pettecrew y Kalff, 1992).

Las raíces de las plantas son las responsables de disminuir las sustancias disueltas en el agua.

Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta (Vymazal y col., 1998; Dierberg y Brezonik, 1984).

Producen estabilidad al lecho debido a la compactación del terreno.

En invierno, el relleno tiene una protección natural contra el frío (García y col., 2003; Brix, 1994a).

Las raíces actúan como superficie para la fijación de microorganismos, aumentando así, la superficie de biopelícula (Kadlec y Knight, 1996; Bastviken y col., 2005).

4.2.5.1.4 Mecanismos básicos de depuración en un humedal artificial

La efectividad de los humedales artificiales para contrarrestar los altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el agua residual es muy buena, así como, sólidos suspendidos (SS), nitrógeno, niveles significativos de metales, patógenos y compuestos orgánicos traza. Debido al limitado contacto del agua residual con el suelo, la eliminación de fósforo es mínima. Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizado, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbológica de la DBO y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Cuando no se practica la poda de las plantas, se encuentra una fracción de la vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal.

En la tabla 4.2 se muestran los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual.

Tabla 4.2 Mecanismos de depuración en humedales artificiales.

Contaminantes	Mecanismos de depuración
Sólidos suspendidos	Sedimentación Filtración
Materia orgánica	Degradación microbiana aerobia Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación. Asimilación por parte de las plantas Adsorción principal Volatilización del amoníaco
Fósforo	Adsorción por parte del lecho Asimilación por parte de las plantas
Metales	Asimilación por parte de las plantas Intercambio iónico
Patógenos	Sedimentación Filtración Muerte natural Irradiación ultravioleta

4.2.5.2 Métodos de eliminación de contaminantes

Originalmente solo parecía necesario procesar la materia orgánica y la materia en suspensión. Posteriormente, se ha visto necesaria la eliminación de los nutrientes (nitrógeno y fósforo). El siguiente paso es ya sin duda la inactivación de los organismos fecales, puesto que el reciclaje del agua se ve cada vez más necesario.

4.2.5.3 Sólidos suspendidos

Se denominan sólidos suspendidos a aquellos sólidos que quedan retenidos en un filtro estandarizado de tamaño de poro $1.2\mu\text{m}$. En los humedales se producen unos procesos físicos conocidos como filtración del medio granular consiguiendo así la eliminación de la materia en suspensión. Los materiales en suspensión son retenidos en la zona próxima al efluente, especialmente en el caso de los humedales horizontales. Su concentración decrece exponencialmente a lo largo de la instalación, realizándose la eliminación de la mayor parte de esta materia en el primer tercio del lecho del humedal. En humedales verticales la eliminación de materiales en suspensión se realiza cerca de la superficie, y los gradientes de concentración son similares a los de flujo horizontal. En el caso de una concentración mayor de 50 mg/l de materiales en suspensión, y si están constituidos por arenas o materiales orgánicos recalcitrantes, es necesario un pre tratamiento. Su ausencia puede desembocar en una rápida colmatación del medio granular.

4.2.5.4 Materia orgánica

La materia orgánica presente en el agua residual se puede dividir en particulada y disuelta. En los sistemas horizontales, la materia orgánica particulada se deposita por filtración en la zona próxima al efluente. En los sistemas de flujo vertical, se deposita cerca de la superficie. Los procesos de fragmentación abiótica reducen el tamaño de las partículas, permitiendo su hidrólisis por enzimas extracelulares. Estas enzimas, procedentes de bacterias fermentativas facultativas y heterótrofas aerobias, asimilan los sustratos sencillos resultantes de esta hidrólisis. No es necesaria una hidrólisis previa para su asimilación en el caso de los sustratos sencillos existentes en el agua residual. Los ácidos resultantes se asimilan por bacterias sulfatorreductoras, metanogénicas, y por las heterótrofas aerobias.

La degradación de la materia orgánica disuelta se produce por microorganismos que forman la biopelícula mediante procesos aerobios y anaerobios. La degradación aerobia se produce por la acción de bacterias aerobias heterótrofas. Un aporte insuficiente de oxígeno hace decaer rápidamente el crecimiento de este grupo de bacterias. La degradación anaerobia se produce en varias etapas y en las zonas de humedal donde hay ausencia de oxígeno disuelto. El proceso es realizado por bacterias heterótrofas de tipo anaerobio estricto o facultativo. En la primera etapa las moléculas complejas se transforman por fermentación en compuestos sencillos intermedios como ácido acético, ácido láctico, etanol y gases.

En una segunda etapa otros grupos de bacterias degradan los productos intermedios.

En función del sustrato existente se pueden dar varios procesos, los más importantes son:

- a) Metanogénesis.
- b) Sulfatorreducción.
- c) Desnitrificación.

Las bacterias aerobias son más eficientes ya que obtienen con un mismo sustrato más energía que las bacterias anaerobias.

A grandes rasgos, se concluye que la eliminación de la materia orgánica en humedales someros se produce principalmente por desnitrificación seguida de la sulfatorreducción, mientras en humedales profundos, actúa principalmente la sulfatorreducción. Este hecho justifica que humedales someros obtengan efluentes de mejor calidad que los profundos ya que permiten una mejor reaeración (debido al aumento de la velocidad transversal del agua y a la poca profundidad) y una mejor distribución de las raíces y de los rizomas en el medio granular.

La eliminación de la materia orgánica en humedales artificiales alcanza rendimientos entre el 75 y 95%, alcanzando fácilmente concentraciones en el efluente de 20mg/l para la DBO y 60mg/l para la DQO. (Kadlec, R.H., et al., 1996).

La gran mayoría de los contaminantes emergentes son de origen orgánico, y en un humedal artificial serán eliminados por las vías que se han descrito anteriormente. La idoneidad de un humedal artificial para eliminar estos compuestos reside en que los elementos que lo componen generan un ambiente propicio para que puedan darse esos mecanismos pero de manera natural, con un relativamente bajo aporte energético y un también bajo mantenimiento.

La aireación del suelo y la ralentización del agua y sedimentación de los sólidos debido a las raíces, el aumento de la superficie disponible para la formación de la biopelícula (por los tallos y hojas sumergidos) además de la presencia de vegetación, crea un gradiente de luz y da abrigo al humedal de manera que pueda seguir funcionando correctamente incluso a temperaturas por debajo de -40 grados Celsius (Kadlec et al., 2000).

Los humedales artificiales poseen la habilidad de eliminar algunos PPCPs (Conkle et al., 2008; Park et al., 2009) pero los mecanismos implicados no son completamente conocidos.

La coexistencia de varios microambientes dentro de un humedal artificial fomenta la biodiversidad microbiológica que pueden ofrecer distintos tipos de rutas metabólicas conducentes a la degradación de los contaminantes (PPCP's y medicamentos). Esta coexistencia tiene relación con la variación de los gradientes de parámetros físico-químicos (Imfeld et al., 2009). Algunas de estas variaciones pueden ser generadas por los organismos que habitan estos humedales artificiales. Aunque en los humedales artificiales se ha observado la capacidad para eliminar PPCP's, en cierta medida, la configuración óptima para este fin es aún desconocida.

Estudios realizados por la Universidad de León (María Hijosa-Valsero, et al., 2010) con diferentes tipos de humedales artificiales, construidos a escala de laboratorio con medio metro cúbico de volumen y con diferentes configuraciones, funcionando al aire libre (1 metro cuadrado de superficie libre) durante nueve meses, sirvieron para evaluar la capacidad de eliminación de los productos farmacéuticos y productos de cuidado personal de las aguas residuales urbanas. Los humedales artificiales diferían unos de otros en parámetros de diseño, es decir, la presencia de las plantas, las especies elegidas (*Tipha angustifolia* vs *Phragmites australis*), la configuración del caudal (el flujo superficial vs flujo subsuperficial), la presencia o ausencia de un lecho de grava, y los tiempos de retención hidráulicos que varían entre 2 y 3 días. Todos ellos fueron alimentados con el mismo influente procedente de la misma depuradora con la misma concentración de contaminantes. Los resultados obtenidos indicaron que la presencia de las plantas favorecía la eliminación de PPCP's en la siguiente medida:

Los anti-inflamatorios y analgésicos basados en el ketoprofeno tuvieron eficiencias de eliminación de entre el 11 y 50% con una mejor eliminación en el tipo de humedal de flujo subsuperficial, superficial (ambos con lecho) y sin lecho, con micrófitos en flotación. Este dato fue obtenido en invierno, y a pesar de la baja insolación, pareció ser suficiente para la degradación del ketoprofeno del cual se cree que su degradación está relacionada con la fotocatalisis solar (Lin and Reinhard, 2005; Pereira et al., 2007). La eficiencia de la eliminación del Naproxeno varía entre 27-66% en invierno y 27-83% en verano, siendo los humedales artificiales de flujo subsuperficial los que mejores resultados obtuvieron.

El Ibuprofeno se eliminó con unas eficiencias de entre el 27-74% en invierno y el 6-96% en verano en el tipo de humedales artificiales de flujo superficial, sin lecho, con macrófitos flotantes, seguido de los humedales artificiales con 25 cm de lecho de grava y lámina de agua del mismo espesor.

El Naproxeno e Ibuprofeno mostraron eficiencias de eliminación variable en otro tipo de configuración de humedales artificiales y dependientes de parámetros como la profundidad y el tipo de grava que conforma el lecho, así como el flujo (Matamoros et al., 2005; Matamoros and Bayona, 2006, Matamoros et al., 2009). Solo el Diclorofenaco mostró una continuidad en la eficiencia de eliminación en cualquier tipo de humedal artificial, variando esta entre el 17 al 26% en invierno y del 36 al 52% en verano. En cualquier caso, las tasas más altas de eficiencia de eliminación (65-96%) fueron obtenidas por un sistema híbrido de humedales conectados en serie (Hijosa-Valsero et al., 2010), y trabajando como tratamiento terciario (Matamoros et al., 2008a).

El ácido salicílico fue la sustancia más fácil de degradar por cualquier tipo de configuración de humedal, con eficiencias entre el 35 al 85% en invierno y entre el 84 al 89% en verano. Así mismo las drogas estimulantes como la cafeína también presentaba una alta tasa de eficiencia en su eliminación por cualquier combinación de humedal, situándose entre el 23 al 58% en invierno y entre el 82 al 99% en Verano (Matamoros and Bayona, 2006; Conkle et al., 2008; Hijosa-Valsero et al., 2010), (Matamoros et al., 2009).

En definitiva, algunos de los humedales artificiales estudiados ofrecen, como mínimo, unas tasas de eficiencia en la eliminación tan buenas como las plantas de tratamiento de agua convencionales en la eliminación de PPCP's, ketoprofeno, Ibuprofeno, diclofenaco, carbamazepina, cafeína, etc.

Algunos diseños eliminan mejor algunos contaminantes que otros. Por ejemplo, los humedales artificiales de flujo superficial en lámina libre presentaron buenas tasas de eliminación para ketoprofeno, ibuprofeno y carbamazepina, mientras que los humedales artificiales de evacuación del flujo por vía subsuperficial eliminaba eficientemente el ketoprofeno y el ácido salicílico.

4.2.5.5 Nitrógeno

El nitrógeno se puede encontrar en la naturaleza de diferentes formas: nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (NH_4^+) o nitrógeno oxidado (NO_2 y NO_3). Los procesos que intervienen en la eliminación del amonio son la volatilización, adsorción, asimilación y nitrificación-desnitrificación. En los humedales artificiales, intervienen varios procesos, aunque el principal corresponde a la nitrificación, que corresponde a un proceso microbiano de transformación de dos fases que transforma el nitrógeno amoniacal en nitratos por oxidación.

También intervienen la asimilación en plantas y la adsorción, pero en menor medida.

La velocidad de nitrificación depende directamente de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

Se ha comprobado que existen diferentes concentraciones de amonio en función de la profundidad del lecho con concentraciones menores en la superficie. La adopción de sistemas combinados de humedales con distintas características de flujo permite mejorar la eliminación de nitrógeno. En los humedales verticales se obtienen muy buenos rendimientos de conversión del amonio a nitrato dado el carácter aerobio de la gran parte del lecho. En general en estos sistemas, la nitrificación es total.

Otro proceso de eliminación de nitrógeno es la asimilación por parte de las plantas, generalmente de amonio ya que es el más abundante. El nitrógeno se incorpora a la biomasa y durante su senescencia anual, puede retornar al humedal, por este motivo se recomienda podar la vegetación justo antes de este periodo. Se puede conseguir por medio de las plantas entre un 10 y 20% de eliminación de nitrógeno.

4.2.5.6 Fósforo

De la misma manera que en los sistemas convencionales de depuración, la eliminación del fósforo es complicada, siendo en los diseños más habituales entre un 10 y 20% del fósforo inicial. Los mecanismos de eliminación suelen ser de tipo biótico, asimilación por parte de las plantas y microorganismos, y abiótico, que incluye la adsorción por medio granular. La pérdida de adsorción del material granular reduce la buena eficiencia inicial de eliminación del fósforo. En la actualidad parece que la mejor manera de eliminar el fósforo es incorporando en los sistemas de humedales procesos de precipitación, por ejemplo por adición de sales de aluminio (Arias, C.A. Y Brix, H., 2005)

Aunque no es del todo recomendable la utilización de sales de hierro para la precipitación ya que puede dar lugar a sulfuro de hierro que da color negro al agua.

4.2.5.7 Patógenos

Los humedales construidos y especialmente los de flujo subsuperficial, favorecen la tendencia natural de las poblaciones microbianas mixtas a adherirse y acumularse formando las biopelículas o biofilms. Los microorganismos adheridos que forman parte del biofilm crecen, se multiplican y forman productos extracelulares poliméricos que conforman la propia matriz del biofilm desarrollando un papel fundamental en las distintas transformaciones de los principales contaminantes. Las poblaciones adheridas asimilan de 2 a 5 veces más glucosa y presentan tasas de respiración más elevadas que las células en suspensión (Fletcher, et al., 1986).

Los patógenos microbianos, entre los que se incluyen a los helmintos, protozoarios, hongos, bacterias y virus, son de gran importancia en la elaboración de la calidad del agua. El indicador más utilizado es el de los coliformes fecales aunque también se han estudiado los estreptococos fecales, Salmonella, Yersinia, Pseudomonas y Clostridium. Todas estas bacterias junto con los virus decrecen a su paso por los humedales. De algunos protozoos y sus quistes, como Gardia y Criptosporidium, algunos helmintos, incluyendo los huevos del nemátodo Ascaris y varias especies de amebas, se conoce menos su comportamiento, aunque sí se revela su disminución en el paso por los humedales. (Rivera F. et al., China, 1994).

La eliminación de microorganismos es un proceso de gran complejidad ya que depende de factores como la filtración, la adsorción y la depredación. Su eliminación es claramente dependiente del tiempo de permanencia, en el que los humedales que disponen de TRH mayores ofrecen rendimientos superiores y del medio granular, ya que a menor tamaño de la grava, mayor es la superficie disponible para la formación de biopelícula, obteniéndose así mayor rendimiento en la eliminación. Retenciones largas en el sistema eliminará a patógenos que no tengan la capacidad de soportar largos periodos fuera del huésped. El paso del agua por fases aerobias y anaerobias, cambios de temperatura y pH, debilitarán y/o eliminarán a los microorganismos que no estén acostumbrados a estos cambios de medio.

Otros mecanismos de eliminación, son fundamentalmente debidos a los procesos de sedimentación, filtración, absorción, depredación por nemátodos y protistas, ataque lítico por bacterias y virus y muerte por condiciones ambientales desfavorables, incluyendo la radiación UV y la temperatura. Por su parte los factores físico-químicos que ayudan a la eliminación de bacterias son la oxidación, la adsorción y la exposición a compuestos tóxicos procedentes de otros mecanismos de depuración en el humedal.

Capítulo V

Conclusiones

Se logró el objetivo de la tesis consistente en describir los efectos en la salud y en el ambiente

Si bien es cierto que la globalización ha hecho crecer aceleradamente el empleo de nuevas tecnologías en México, éstas han sido explotadas en su mayoría para la obtención de más recursos económicos, sin darles la importancia y atención que requieren los impactos ambientales que generan.

México ha participado en varios foros internacionales, sin embargo, no son suficientes los avances realizados por nuestro gobierno para transformar los procesos productivos. Por ejemplo, se necesita el uso de energías renovables (energía geotérmica, energía eólica, etc.)

La conversión tecnológica implica altos costos, pero es necesario impulsarla, y esto es viable con el apoyo del gobierno. Es muy importante hacer que la sociedad se concientice y sensibilice sobre todos los impactos producidos por la utilización de estas tecnologías, así como la aplicación de las alternativas viables que minimicen los impactos producidos.

El uso excesivo de productos farmacéuticos y para el cuidado personal (PPCPs por sus siglas en inglés) en nuestro país va en aumento. Basta observar su uso en hospitales, oficinas, escuelas, centros recreativos, hoteles, restaurantes, etc. La participación conjunta del núcleo familiar, centros educativos, centros de investigación, empresas particulares y de gobiernos encaminados al uso racional de los PPCPs será fundamental para evitar el continuo deterioro de nuestra salud y del ambiente.

Las consecuencias del uso de sustancias químicas a nivel mundial son preocupantes ya que la presencia de contaminantes emergentes se ha detectado en aguas superficiales y subterráneas que son fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano.

Es por esto que se deberá actuar para adoptar la reglamentación y normatividad que puedan regular su uso en nuestro país, ya que actualmente no se dispone de ella.

De acuerdo al análisis de la matriz de impacto ambiental elaborada para este trabajo, se concluye que la fauna terrestre así como las aguas superficiales son las que sufren el mayor daño a causa de los contaminantes emergentes, sin embargo, considerando que todos interactuamos en la cadena trófica, directa o indirectamente resultaremos afectados en nuestra salud.

El objetivo pues, será reducir al máximo posible el empleo de sustancias que producen contaminantes presentes en las aguas residuales para que estas no causen efectos nocivos a nuestra salud.

Se han desarrollado diferentes metodologías analíticas para la identificación de contaminantes emergentes en aguas, una de las técnicas más usadas es la de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas.

El desarrollo y aplicación de estas técnicas de identificación de contaminantes será primordial para el avance en el uso adecuado y control de sustancias químicas.

En México no se han construido suficientes plantas de tratamiento para el gasto de aguas residuales generado, y los proyectos resultan muy costosos por lo que se requiere una alternativa de bajo costo de inversión y mantenimiento.

El uso de humedales artificiales es viable en zonas rurales en donde en su mayoría se dispone de grandes extensiones de terreno, lo que se podrá complementar con programas diseñados para disminuir el uso de sustancias que generen contaminantes emergentes. Estos programas también deberán incluirse en los planes de estudio desde la educación básica y ser reforzados por el gobierno, implementándolos en los medios de comunicación masivos.

A nivel nacional se propone:

Uso de recipientes para la recolección de medicamentos caducos y o deteriorados.

Uso de productos farmacéuticos biodegradables.

Realizar vía instituciones públicas y privadas campañas de educación e información.

Control de uso de productos de cuidado personal y control del consumo de productos farmacéuticos y drogas.

Par evitar dañar el medio ambiente es recomendable utilizar productos reciclables, contribuyendo así a reducir la demanda de los productos no degradables y con esto presionar a que las empresas se dediquen a la fabricación de productos ecológicos.

ANEXOS

Tabla 2.5. Límites permisibles para agua potable

Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)	
Microbiológicos	Organismos coliformes totales	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	5%	n.e.
	Organismos coliformes fecales, E. Coli u organismos termotolerantes	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	No detectable	n.e.
	<i>Legionella</i>	NMP/100 mL	n.e.	Se reporta 0 NMP/100mL como la meta de nivel máximo de contaminación	n.e.
	<i>Giardia lamblia</i>	quistes	n.e.	Se requiere el 99.9% de eliminación en el proceso de filtración	n.e.
	<i>Cryptosporidium</i>	quistes	n.e.	Se requiere el 99% de eliminación en el proceso de filtración	n.e.
	HPC	UFC/ mL	n.e.	500	n.e.
	Virus entéricos	UFC/100 mL	n.e.	Se requiere el 99.9% de eliminación en el proceso de filtración	n.e.
Organolépticos	Color	Color verdadero en la escala de Pt-Co	20	15	15
	Olor y sabor	-	Agradable	3 (umbral del olor)	Agradable
Fertilizantes	Ácido nitrilotriacético (NTA)	µg/L	n.e.	n.e.	200

Parámetro		Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
Fisicoquímicos	pH (potencial de hidrógeno)	unidades de pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5
	Sólidos disueltos totales	mg/L	1000	500	1000
	Turbiedad	UTN	5	5	5
	Corrosividad	-	n.e.	No corrosivo	n.e.
	Oxidabilidad	mg/L O ₂	n.e.	n.e.	n.e.
Inorgánicos	Aluminio	mg/L	0.2	0.05 a 0.2	0.2
	Antimonio	mg/L	n.e.	0.006	0.02
	Arsénico	mg/L	0.05	0.01	0.01
	Asbesto	MF/L	n.e.	7	n.e.
	Bario	mg/L	0.7	2	0.7
	Berilio	mg/L	n.e.	0.004	n.e.
	Boro	mg/L	n.e.	n.e.	0.5
	Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.003
	Cianuros (como CN ⁻)	mg/L	0.07	0.2	0.07
	Cloro residual libre	mg/L	0.2-1.50	n.e.	n.e.
	Cloruros (como Cl ⁻)	mg/L	250	250	n.e.
	Cobre	mg/L	2	1.3	2
	Cromo total	mg/L	0.05	0.1	0.05
	Fierro	mg/L	0.3	0.3	n.e.
	Fluoruros (como F ⁻)	mg/L	1.5	4	1.5
	Manganeso	mg/L	0.15	0.05	0.4
	Mercurio	mg/L	0.001	0.002	0.006
	Molibdeno	mg/L	n.e.	n.e.	0.07
	Níquel	mg/L	n.e.	n.e.	0.07
	Nitratos (como N)	mg/L	10	10	11.30

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Nitritos (como N)	mg/L	1	1	1
	Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	0.5	n.e.	n.e.
	Plata	mg/L	n.e.	0.1	n.e.
	Plomo	mg/L	0.01	0.015	0.01
	Selenio	mg/L	n.e.	0.05	0.01
	Sodio	mg/L	200	n.e.	200
	Sulfatos (como SO ₄)	mg/L	400	250	250
	Sulfuros (como H ₂ S)	mg/L	n.e.	n.e.	n.e.
	Talio	mg/L	n.e.	0.002	n.e.
	Yodo libre residual	mg/L	0.2 - 0.5	n.e.	n.e.
	Zinc	mg/L	5	5	n.e.
	1,1 dicloroetileno	µg/L	n.e.	7	n.e.
Orgánicos	1,2-dibromoetano	µg/L	n.e.	n.e.	0.4
	1,2-diclorobenceno	µg/L	n.e.	n.e.	1000
	1,2-dicloroetano	µg/L	n.e.	5	30
	1,2-dicloroetano	µg/L	n.e.	n.e.	50
	1,4-diclorobenceno	µg/L	n.e.	n.e.	300
	1,2-Dicloropropano (1,2 DCP)	µg/L	n.e.	5	40
	1,4-dioxano	µg/L	n.e.	n.e.	50
	1,1,1-tricloroetano	µg/L	n.e.	200	n.e.
	1,1,2-tricloroetano	µg/L	n.e.	5	n.e.
	1,2,4-triclorobenceno	µg/L	n.e.	70	n.e.
	Acido nitrilo acético	µg/L	n.e.	n.e.	200
	Acilamida	µg/L	n.e.	n.e.	0.5

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Benceno	µg/L	10	5	10
	Benzopireno	µg/L	n.e.	0.2	0.7
	Bifenilos policlorados	µg/L	n.e.	0.5	n.e.
	Cis-1,2-dicloroetileno	µg/L	n.e.	70	n.e.
	Clorobenceno	µg/L	n.e.	100	n.e.
	Cloruro de vinilo	µg/L	n.e.	2	0.3
	Cloruro de cianógeno	µg/L	n.e.	n.e.	70
	Di(2-etilhexil)adipato	µg/L	n.e.	400	n.e.
	Di(2-etilhexil)ftalato	µg/L	n.e.	6	8
	Dibromuro de etileno	µg/L	n.e.	0.05	n.e.
	Dicloroacetato	µg/L	n.e.	n.e.	50
	Diclorometano	µg/L	n.e.	5	20
Orgánicos	Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	µg/L	n.e.	3.0E-05	n.e.
	Dureza total (como CaCO ₃)	µg/L	500,000	n.e.	n.e.
	EDTA	µg/L	n.e.	n.e.	600
	Epiclorhidrina	µg/L	n.e.	n.e.	0.4
	Estireno	µg/L	n.e.	100	20
	Etilbenceno	µg/L	300	700	300
	Fenoles o compuestos fenólicos	µg/L	300	n.e.	n.e.
	Hexaclorobenceno	µg/L	1	1	n.e.
	Hexaclorobutadieno	µg/L	n.e.	n.e.	0.6
	Hexaclorociclopentadieno	µg/L	n.e.	50	n.e.
	Microcystin-LR	µg/L	n.e.	n.e.	1

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Monocloroacetato	µg/L	n.e.	n.e.	20
	o-diclorobenceno	µg/L	n.e.	600	n.e.
	p-diclorobenceno	µg/L	n.e.	75	n.e.
	Pyriproxyfen	µg/L	n.e.	n.e.	300
	SAAM	µg/L	500	500	n.e.
	Terbutilazina	µg/L	n.e.	n.e.	7
	Tetracloroetano	µg/L	n.e.	n.e.	40
	Tetracloroetileno	µg/L	n.e.	5	n.e.
	Tetracloruro de carbono	µg/L	n.e.	5	4
	Tolueno	µg/L	700	1,000	700
	Trans-1,2-dicloroetileno	µg/L	n.e.	100	n.e.
	Tricloroacetato	µg/L	n.e.	n.e.	200
	Tricloroetano	µg/L	n.e.	n.e.	20
	Tricloroetileno	µg/L	n.e.	5	n.e.
	Xileno (tres isómeros)	µg/L	500	10,000	500
	1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	µg/L	n.e.	0.2	1
Plaguicidas	1,3-Dicloropropeno	µg/L	n.e.	n.e.	20
	2,4 - D	µg/L	30	70	30
	2,4-DB	µg/L	n.e.	n.e.	90
	2,4,5-T	µg/L	n.e.	n.e.	9
	2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	n.e.	50	n.e.
	Alaclor	µg/L	n.e.	2	20
	Aldicarb	µg/L	n.e.	n.e.	10

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Aldrín y dieldrín	µg/L	0.03	n.e.	0.03
	Atrazina	µg/L	n.e.	3	2
	Carbofuran	µg/L	n.e.	40	7
	Cianazina	µg/L	n.e.	n.e.	0.6
	Clordano (total de isómeros)	µg/L	0.2	2	0.2
	Clorotoluron	µg/L	n.e.	n.e.	30
	Clorpirifos	µg/L	n.e.	n.e.	30
	Dalapon	µg/L	n.e.	200	n.e.
	DDT (total de isómeros)	µg/L	1	n.e.	1
	Diclorprop	µg/L	n.e.	n.e.	100
	Dimetoato	µg/L	n.e.	n.e.	6
	Dinoseb	µg/L	n.e.	7	n.e.
	Diquat	µg/L	n.e.	20	n.e.
	Endothall	µg/L	n.e.	100	n.e.
	Endrin	µg/L	n.e.	2	0.6
	Fenoprop	µg/L	n.e.	n.e.	9
	Glifosato	µg/L	n.e.	700	n.e.
	Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L	0.03	0.4 para heptacloro y 0.2 para el epóxido de heptacloro	n.e.
	Isoproturon	µg/L	n.e.	n.e.	9
	Lindano	µg/L	2	0.2	2
	MCPA	µg/L	n.e.	n.e.	2

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Mecoprop	µg/L	n.e.	n.e.	10
	Metolaclor	µg/L	n.e.	n.e.	10
	Metoxicloro	µg/L	20	40	20
	Oxamilo (vydate)	µg/L	n.e.	200	n.e.
	Pendimetalina	µg/L	n.e.	n.e.	20
	Pentaclorofenol	µg/L	n.e.	1	9
	Permetrina	µg/L	n.e.	n.e.	300
	Picloram	µg/L	n.e.	500	n.e.
	Simazina	µg/L	n.e.	4	2
	Toxafeno	µg/L	n.e.	3	n.e.
	Trifluralin	µg/L	n.e.	n.e.	20
Desinfectantes	Monocloramina	mg/L	n.e.	n.e.	3
	Cloro	mg/L	n.e.	4	5
	Dióxido de cloro (ClO₂)	mg/L	n.e.	0.8	n.e.
Subproductos de la desinfección.	2,4,6-triclorofenol	mg/L	n.e.	n.e.	0.2
	Ácido dicloroacético	mg/L	n.e.	0	n.e.
	Ácidos haloacéticos	mg/L	n.e.	0.06	n.e.
	Ácido tricloroacético	mg/L	n.e.	0	n.e.
	Bromato	mg/L	n.e.	0.01	0.01
	Bromodiclorometano	mg/L	n.e.	0.3	0.06
	Bromoformo	mg/L	n.e.	0	0.1
	Cloraminas (como Cl₂)	mg/L	n.e.	4	n.e.
	Clorato	mg/L	n.e.	n.e.	0.7

	Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 ^a (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)
	Clorito	mg/L	n.e.	1	0.7
	Cloroformo	mg/L	n.e.	n.e.	0.3
	Dibromoacetoni-trilo	mg/L	n.e.	n.e.	0.07
	Dibromoclorometano	mg/L	n.e.	n.e.	0.1
	Dicloroacetoni-trilo	mg/L	n.e.	n.e.	0.02
	Trihalometanos totales	mg/L	0.2	0.08	n.e.
Radiactivos	Radiactividad alfa global	Bq/L	0.56	n.e.	n.e.
	Radiactividad beta global	Bq/L	1.85	n.e.	n.e.
	Partículas alfa	pCi/L	n.e.	15	n.e.
	Partículas beta y emisores fotón	mrems/year	n.e.	4	n.e.
	Radio 226 y 228 combinados	pCi/L	n.e.	5	n.e.
	Uranio	mg/L	n.e.	0.03	0.015

NMP/100mL: Numero más probable por 100 mililitros.

UFC/mL:

U-Pt/Co: Unidades formadoras de placas en 100 mililitros.

µg/L: Microgramos por litro.

UTN: Unidades de turbiedad nefelométricas.

mg/L: Miligramos por litro.

MF/L: Millones de fibras por litro (fibras > 10 micrómetros).

Bq/L: Becquerel por litro.

pCi/L: Picocuries por litro.

mrems/year: Milirems por año.

Glosario.

Plantas potabilizadoras: Conjunto de estructuras destinadas a procesar el agua, para tratarla y entregarla en condiciones aptas para el consumo humano.

Plantas de aguas residuales: Conjunto de estructuras diseñadas para que cumplan con los procesos adecuados para la depuración de aguas residuales.

Efluente: Líquido residual que fluye de una instalación.

Lixiviado: Líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido.

Percolación: Proceso de filtración del agua a través de una franja de determinado tipo de suelo.

Relleno sanitario: Espacio donde se depositan desechos sólidos provenientes de una ciudad, después de haber recibido un determinado tratamiento para evitar la contaminación del suelo adyacente.

Alquifenoles etoxilados: Son sustancias que se encuentran en detergentes y otros productos de cuidado personal.

Esteroides: Son compuestos orgánicos.

Hormonas: Sustancias que el cuerpo produce mediante glándulas endocrinas para que en el trayecto de la circulación de la sangre, se realice el buen funcionamiento de todos los órganos.

Urbe: Ciudad.

Patógeno: Que produce una enfermedad.

Contaminantes antropogénicos: Contaminantes producidos por la humanidad.

Microorganismos patógenos: Son aquellos que producen enfermedades en los seres humanos. Estando presentes en el agua se dividen en virus, bacterias y protozoos. Los virus y bacterias se encuentran presentes en aguas subterráneas y superficiales, mientras que los protozoos son comunes en aguas superficiales.

Trihalometanos: Sustancias volátiles que se generan al potabilizar el agua.

Ácido haloacético: Compuestos químicos que contienen cloro y bromo, y que son formados por el proceso de desinfección del agua.

Pre ozonación: Inicio en el proceso de desinfección del agua en el cual se logra una primera desinfección eliminando el hierro y el manganeso, además de ayudar en el proceso de coagulación.

Cloraminas: Compuesto usado en bajas concentraciones como un desinfectante secundario en sistemas municipales de distribución de agua.

Halonitrometanos: Son subproductos originados en el proceso de desinfección del agua.

Nitrosaminas: Sustancia química que se encuentra en los productos del tabaco y en el humo originado en su quema, así como en alimentos fritos, carne, pescado, etc.

Metabolitos: Sustancia producida durante el metabolismo.

Síntesis orgánica: Procedimiento mediante el cual se obtiene un compuesto a partir de otras sustancias más simples.

Matriz biológica: Son fluidos y líquidos provenientes del ser humano. Se utilizan para determinar en laboratorios por ejemplo los niveles de triglicéridos en la sangre para que el médico pueda dar un diagnóstico a su paciente.

Actividad biológica: Son los efectos adversos o benéficos de una droga sobre la materia viva.

Principio activo: Componente que tiene una sustancia con la capacidad de producir efectos en los seres vivos.

Enzima: Es una proteína que actúa como catalizador de una reacción química acelerándola.

Parámetro: Dato que se asigna para poder evaluar una determinada situación.

Inocuas: Significa que no es dañina.

Nitratos: Anión de fórmula NO_3 .

Anión: Es un ion con carga neta negativa.

Ion: Átomo o grupo de átomos que tienen una carga neta positiva o negativa.

Catión: Es un ion con carga neta positiva.

Trazas: Restos muy pequeños de una sustancia.

Coliformes totales: Grupo de bacterias que se utilizan como indicadores de contaminación. El grupo está compuesto de *Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *klebsiella*.

Coliformes fecales: Bacteria que es de origen fecal (intestino de hombres y animales) y se le llama *Escherichia coli*.

Adsorción: Atracción y retención que realiza un cuerpo en su superficie de iones, átomos o moléculas que pertenecen a un cuerpo diferente.

Síntesis celular: Reacción química dentro de la célula que consume energía.

Virus: Es un organismo que se replica a si mismo cuando invade a una célula (animal, vegetal o bacteriana).

Priones: Partículas infecciosas formadas por proteínas.

Bacterias: Son organismos unicelulares microscópicos.

Hongos: Organismos vivos que habitan en terrenos húmedos y cálidos. Los hay inofensivos y tóxicos.

Protozoos: Son parásitos de muchos organismos.

Helmintos: Son gusanos.

Planta convencional: Conjunto de equipos e instalaciones.

Fenoles etoxilados: Son los componentes activos que se utilizan en la mayoría de los surfactantes que contienen los pesticidas.

Triclosan: Producto químico antibacteriano utilizado en jabones y otros productos de cuidado personal.

Anfetamina: Tipo de droga que estimula el sistema nervioso central.

Zooplankton: Es la fracción del plancton constituida por seres que se alimentan, por ingestión, de materia orgánica ya elaborada.

Citostáticos: Sustancias farmacológicas que impiden o retardan la división celular. Se utilizan en el tratamiento contra el cáncer.

Cocaína: Es una planta que se cultiva en América del Sur, y, que mediante procesos de purificación se obtiene un polvo blanco e inoloro.

Disruptores endocrinos: Sustancias químicas capaces de alterar el sistema hormonal ocasionando diferentes daños sobre la salud humana y animal.

Organismos bentónicos: Es la comunidad formada por los organismos que habitan en el fondo de los sistemas acuáticos.

Ubicuidad: Capacidad de estar presente en varios lugares al mismo tiempo.

Cromatografía: Método de separación en el que se puede obtener el número de compuestos químicos que están presentes en una mezcla.

Congéneres: Que comparte con otro u otros el mismo origen.

Fungicida: Sustancia toxica que se emplea para inhibir el crecimiento o propagación de mohos y hongos perjudiciales para plantas, animales y humanos.

Estrógeno: Hormona esteroide secretada por los ovarios y, en menor cantidad, por las glándulas suprarrenales y los testículos.

Ecosistema: Conjunto de componentes físicos y biológicos de un entorno.

Absorción: Retención por una sustancia de las moléculas de otra en estado líquido o gaseoso.

Fotosíntesis: Proceso a través del cual las plantas, las algas y algún tipo de bacteria captan la energía de la luz que emana el sol y la utilizan para transformar la materia inorgánica de su medio externo en materia orgánica que les resultara fundamental a la hora de su crecimiento y desarrollo.

Depuración: Eliminación de la suciedad o impurezas de una sustancia.

Foto oxidación: Reacciones de oxidación inducidas por la luz.

Biopelícula: Es un ecosistema microbiano organizado, conformado por uno o varios microorganismos asociados a una superficie viva o inerte.

Abiótico: Medio, que por sus características, no puede albergar ninguna forma de vida.

Biótico: Flora y fauna de un cierto territorio.

Ralentizar: Acción que permite lograr que algo se vuelva más lento o se desarrolle con menor rapidez.

Colmatación: Acumulación de sedimentos.

Nitrificación: Es la oxidación biológica de amonio con oxígeno en nitrito, seguido por la oxidación de esos nitritos en nitratos. Esta oxidación es hecha por dos especies de bacterias nitrificantes.

Hidrólisis: Es la descomposición o alteración de una sustancia química por el agua.

Metanogénesis: Es la formación de metano por microbios.

Sulfatorreducción: Reducción de sulfato producida por bacterias.

Desnitrificación: Proceso metabólico que usa el nitrato.

Micrófitos: Vegetales inferiores que son invisibles al ojo humano, como por ejemplo las bacterias, ciertas algas y hongos.

Macrófitos: Plantas acuáticas.

Nefelométrica: Unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido.

Acrónimos y Siglas.

COFEPRIS: Comisión Federal para la Prevención de Riesgos Sanitarios.

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua.

DBO5: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DDT: Dicloro-difenil-tricloroetano (pesticida).

DEET: N, N-dietil-meta-toluamida.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

DSP: Residuos de desinfectantes y sus subproductos.

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

NOM-127-SSA1-1994: Norma Oficial Mexicana. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.

PCBs: Bifenilos Policlorados.

PCDDs: Dibenzo-p-p-dioxinas policloradas.

PCDFs: Dibenzofuranos policlorados.

PPCPs: Pharmaceutical and Personal Care Products. (Productos farmacéuticos y de cuidado personal).

PVC: Policloruro de vinilo.

U E: Unión Europea.

USEPA: United States Environmental Protection Agency. (Agencia de protección del ambiente de Estados Unidos).

Referencias bibliográficas

Alaee M(2003) Environ. Monit. Assess. 88,327.

AMES, B.; MAGW, R. y GOLD, L. Ranking possible carcinogenic hazards. En: Science.1987. Vol. 236. 4799. p. 271-280.

Andreozzi R, Marota R, Pinto G y Pollio A, 2002. Carbamazepine in water: persistence in the environment, ozonation treatment and preliminary assessment on algal toxicity. Water Res. 36:2869.

Arias, C.A. y Escudero, A. Hacia la sustentabilidad: Los residuos solidos como Fuente de energia y materia prima.2011. p. 275 – 280.

Arslan I, Dogruel S, Baykal E y Gerone G, 2004. Combined chemical and biological oxidation of penicillin formulation effluent. Journal of Environment Manager 73(2): 155-163.

Ayla Jay, J. y Ford, T. Water concentrations, bioaccumulation, and human health implications of heavy metals in Lake Chapala. En: Hansen, A. M. van Afferden. (eds) The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management. Nueva York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, pp. 123-136.

Bastviken, S. K., Eriksson, P. G., Premrov, A. y Tonderski, K. Potential denitrification in wetland sediments with different plant species detritus. Ecological Engineering, 2005,25(2), 183-190.

Becerril, Bravo José Elías “Contaminantes emergentes en el agua”. Revista Digital Universitaria (en línea). 10 de agosto de 2009, vol. 10, No 8 (Consultada: 20 de septiembre de 2015). Disponible en internet: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num 8/art 54/int 54.htm>

Bedner M. y Mac Crehan W. 2006. Transformation of Acetaminophen by chlorination Produces the Toxicants 1, 4- Benzoquinone and N-Acetyl-p-benzoquinone imine. Environ. Sci. Technol, 40: 516-52240.

Birnbaum L S, Staskal D F (2004) Environ. Health Perspect. 112,9.

Bohacek, R.S., McMartin, C. and Guida, W.C., (1996), The art and practice of structure-based drug design: a molecular modeling perspective. Medicinal Research Reviews 16 I, pp. 3-50.

Carmona y Muñiz, 2014. Contaminación Emergente en el Valle del Mezquital. Rafael.carmona@conagua.gob.mx, flora muñiz@conagua.gob.mx

Colborn T, 2002. Pesticides-how research has succeeded and failed to translate science into policy: endocrinological effects of wildlife. *Env. Health Perspective* 103: 81-86.

Colman, Joan; et al. Identification of developmentally toxic drinking water disinfection by products and evaluation of data relevant to mode of action. En: *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2011. Vol. 254 p. 100-126.

Covaci A, Voorspoels S, de Boer J (2003) *J. Environ. Int.* 29,735.

Damià Barceló (2003), *Emerging pollutants in water analysis TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Volume 22, Pages xiv – xvi.

De Anda, J., y Ulrich, M. (2007) *Modificaciones en el regimen hidrològico y sus efectos en la acumulaciòn de fòsforo y fosfatos en el lago de Chapala, Mexico*. INCI, Caracas, 32, (2). Recuperado de <http://www.scielo.org.vc>

Diaz-Cruz M. 2003. Environmental behavior and analysis of veterinary and human drugs in soils, sediments and sludge. *Trends in Analytical Chemistry*, 22: 340-351.

Dierberg, F.E. y Brezonik, P.L. Nitrogen and Phosphorus Mass Balances in a Cypress Dome Receiving Wastewater. Pags 112-118. en *Ewel, K.C. y Odum, H.T. (Eds.) "Cypress Swamps"*. University of Florida Press. 1984, Gainesville, USA.

Dodds, L.; et al. Trihalomethanes in public water supplies and risk of stillbirth. En: *Epidemiology*. 2004. Vol. 15. No 2, p. 179-186.

Eljarrat E, de la Cal A, Raldùà D, Duràn C, Barcelò D (2004) *Environ. Sci. Technol.* 38,2603.

Eljarrat E, de la Cal A, Raldùà D, Duràn C, Barcelò D (2005a) *Environ. Pollut.* 133,501.

Eljarrat E, de la Cal A, Larrazabal D, Fabrellas B, Rodriguez Fernàndez-Alba A, Borull F, Marcè RM, Barcelò D (2005b). *Environ. Pollut.* 136,493.

Eljarrat, Barcelò D. 2006 *TRAC-Trends Anal. Chem.* 25,421.

Fent k, Weston A & Caminada D. 2006. Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76: 122-159.

Fletcher, M. Measurement of glucose utilization by *Pseudomonas fluorescens* that are free-living and that are attached to surfaces. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1986.

Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderon, A., Sainz, M. G., Bonilla, P., Escolero, o., 1999, *The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico: Water Science and Technology*, 40(2), 45-52.

Garcia, J., Ojeda, E., Sales, E., Chico, F., Piriz, T., Aguirre, P. y Mujeriego, R. Spatial variations of temperature, redox potential and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.* 2003,722, 1-14.

Garmendia, A; Salvador, A.; Crespo, C.; Garmendia, L. Evaluación de impacto ambiental.

Geerdink RB, Niessen WMA, Brinkman U A T 2002 *J. Chromatogr. A* 970,65.

Gogate P. y A. Pandit (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances Environmental Research* 8(3-4): 553-97.

Graniel, C.E., Cardona, a., Carrillo, J. (1999). Hidrogeoquímica en el Acuífero Calcáreo de Mérida Yucatán: Elementos Traza. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XIV, No 3, 19-28 pp.

Gunnarsson L, Adolfsson M, Bjorlenius B, Rutgersson C, Forlin L y Larsson D, 2009. Comparison of six different sewage treatment processes-reduction of estrogenic substances and effects on gene expression in exposed male fish. *Science Total Environmental.* 407(19): 5235-5242.

Gunten, Urs Von. Ozonation of drinking water. Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. En: *Water Research.* 2003. Vol.37. p. 1469-1487.

Hebert, Armelle; et al. Innovative method for prioritizing emerging disinfection by-products (DBPs) in drinking water on the basis of their potential impact on public health. En: *Water Research.* 2010. Vol. 44 p. 3147-3165.

Hernando, M.D., M. Mezcuca, A.R. Fernández-Alba, Barceló D. Environmental Risk Assessment of Pharmaceutical Residues in Wastewater Effluents, Surface Waters and Sediments. *Talanta* 2006b. 69(2): 334-342.

Hernando m, Heath e, Petrovic M, y Barcelo D. 2006. Trace-level determination of pharmaceutical residues by LC-MS/MS in natural and treated waters. A pilot-survey study. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006a. 385(6): 985-991.

Hijosa-Valsero,M., Matamoros, V.,Sidrach-Cardona, R., Martin-Villacorta, J., Bècares, E., & Bayona, J. M. (2010). Comprehensive Assessment of the Design Configuration of Constructed Wetlands for the Removal Pharmaceuticals and Personal care Products from Urban Wastewaters. *Water Research*, 44, 3669-3678.

Hoeger, B., Kollner, B., Dietrich, D., y Hitzfeld, B. (2005). Water-borne diclofenac affects kidney and gill integrity and selected immune parameters in brown trout (*Salmo trutta f. fario*). *Aquatic Toxicology*, 75(1), 53-64.

Huerta, L., Contreras-Valadez, R., Palacios-Mayorga, S., Miranda, J., Calva-Vasquez, G., 2002, Total elemental composition of soils contaminated with wastewater irrigation by combining IBA techniques: Nuclear instruments and methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 189(1-4), 158-162.

ISSN: 1607-6079.

Kadlec, R.H. y Knight, R.L. *Treatment Wetlands*. CRC Press LLC. 1996, Boca Ratón, Nueva York, USA.

IMTA, *Análisis Técnico y Pruebas de Potabilización del agua del acuífero del Valle del Mezquital*, en diversos municipios del estado de Hidalgo. CONAGUA, México, 2010.

JIMENEZ CARTAGENA, Claudio. Contaminantes orgánicos Emergentes en el ambiente; Productos farmacéuticos. *Revista Lasallista de Investigación*, 2011, vol. 8, No. 2 pp. 143- 153.

Kadlec R., Knight R. (1996) *Treatment wetlands*. Lewis-CRC publishers, Boca Raton, F1, USA.

Krishnan A, Starhis P, Permuth S, Tokes L y Feldman D., 1993. Bisphenol A: an estrogenic substance is released from polycarbonate flask during autoclaving. *Endocrine* 132: 2279-2286.

Labandeira A, Eljarrat E, Barcelò D(2006) *Environ. Pollut.* (en prensa).

Laera G, Chong M, Jin B y Lopez A, 2011. An integrated MBR-TiO₂ photocatalysis process for the removal of Carbamazepine from simulated pharmaceutical industrial effluent. *Bioresource Technology*. 102: 7012-7015.

Lesser y Asociados, *Estudio Hidrogeológico del acuífero Valle del Mezquital*, Hidalgo. CONAGUA, México, 2007-2008.

Lesser y Asociados, *Estudios Técnicos de Geohidrología, Calidad del agua, Tenencia de la Tierra y Aspectos Sociales en la zona de captación para el Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo*. CONAGUA, México, 2013, 5 capítulos.

Lewis, C.; et al. Estimated effects of disinfection by-products on preterm birth in a population served by a single water utility. *En: Environ. Health Perspect.* 2007. Vol. 115. No 2, p. 290-295.

Lloret, L.; Eibes, G.; Lù-Chau, T. A.; Moreira, M. T.; Feijoo, G. Lema, J. M. Laccase-catalyzed degradation of anti-inflammatories and estrogens. *Biochem. Eng. J.* 51: 124-131. (2010)

Lloret, L.; Eibes, G.; Moreira, M. T.; Feijoo, G. Lema, J. M. Removal of Estrogenic Compounds from Filtered Secondary Wastewater Effluent in a Continuous Enzymatic Membrane Reactor. Identification of Biotransformation Products. *Environ. Sci. Technol.* 47: 4536-4543. (2013)

Lopez y Zamora. Dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos en peces de 4 regiones diferentes de Mexico. *Ciencias Marinas*, vol. 33, num. 2, junio 2007, pp. 217-227. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México.

Mantzavinos D y E Psillakis, 2004. Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. *Chemical Technology Biotechnology* 79: 431-454.

Marín, L. E., Steinich, B., Escolero, o., Leal, R. M., Silva, B., Gutierrez, S., 1998, Inorganic water quality monitoring using specific conductance in Mexico: Ground Water Monitoring and Remediation, 18(1), 156-162.

Matamoros V., Garcia, J., & Bayona, J. M. (2005). Pharmaceuticals in Subsurface Flow Constructed Wetlands: A pilot-Scale Study. *Environmental Science & Technology*, 39, 5449-5454.

Mckinney J y Waller C, 1994. Polychlorinated biphenyls as hormonally active structural analogues. *Env. Health Perspective* 102: 290-297.

Meironyte D, Noren k, Bergman A (1999) *J. Toxicol. Environ Health* 58,329.

Miao XS, Yang jj. Metcalfe CD(2005) *Environ. Sci. Technol.* 39,7469.

Murugesan, K.; Chang, Y.-Y.; Kim, Y.-M.; Jeon, J.-R. , Kim, E.-J. Chang, Y.-S. Enhanced transformation of triclosan by laccase in the presence of redox mediators. *Water Res.* 44: 298-308 (2010)

Nikolaou A.D.; et al. Factors effecting the formation of organic by-products during water chlorination: a bench-scale study. *En: Water Air Soil Pollut.* 2004. Vol. 159. p. 357-371.

Oller I, Malato S, Sánchez J, Maldonado M y Gassò R, 2007. Detoxification of wastewater containing five common pesticides by solar AOPs-biological coupled system. *Catalysis Today* 129: 69-78.

Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez-Cisneros, B. E., Wintgens, T., 2010, Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies: *Water Research*, 44(6), 1841-1852.

Park, N., Vanderford, B. J., Snyder, S. A., Sarp, S., Kim, S. D. & Cho, J. (2009). Effective Controls of Micropollutants Included in Wastewater Effluent Using Constructed Wetlands under Anoxic Condition. *Ecological Engineering*, 35, 418-423.

Passos, Joel J., et al. Multi – Equilibrium System Based on Sertraline and B – Cyclodextrin Supramolecular Complex in Aqueous Solution. *International Journal of Pharmaceutics*, 2011, vol. 421, No. 1, pp. 24 – 33.

Penuela G A, Barcelò D 2000 J. AOAC Int. 83,53.

Petrovic M, Gonzalez S, Barceló D (2003) *Trac-Trends Anal. Chem.* 22, 685.

Petrovic, Mira; Gonzalez, Susana, Barceló, Damià. Analysis and Removal of Emerging Contaminants in Wastewater and Drinking Water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, vol. 22, No. 10, pp. 685-696.

Pettecrew, E.L. y Kalf, J. Water Flow and Clay Retention in Submerged Macrophyte Bed. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1992, 49, 2483-2489.

Produccion + Limpia –Julio-Diciembre de 2012. Vol. 7, No. 2- 52-73 Correspondencia: Miriam Janet Gil Garzòn e-mail miriamgil@itm.edu.com

Reyes-Solis, I. E., Solis, C., Isaac-Olive, K., Garcia, N. E., Andrade, E., 2009, Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission : *Microchemical Journal*, 91(1), 129-132.

Richardson, Susan. 1998. Drinking water disinfection by-products. En: *Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation*. 1998. Vol. 3. P. 1398-1421.

Richardson, Susan. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. En: *Trends Anal. Chem.* 2003. Vol. 22. No 10, p. 666-884.

Richardson, Susan; et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutation Research e Reviews*. En: *Mutation Research* 2007. Vol. 636. p. 178-242.

Rivera F., Warren A., Ramirez E., Decampo., Bonilla P., Gallegos E., Calderon A. y Sanchez J. T. Removal of pathogens from wastewater by the root zone method (RZM). Guangzhou, China, 1994.

Sadiq, Rehan y RODRIGUEZ, Manuel J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. En: Science of the Total Environment. 2004. Vol. 321, p. 21-46.

Shultz M M, Barofsky D F, Field J A (2003) Environ Eng Sci 20,487.

Silva, Liliana J. G., et al. Selective Serotonin Re-Uptake Inhibitors (SSRIs) in the Aquatic Environment: An Ecopharmacovigilance Approach. Science of the Total Environment, 10/15, 2012, vol. 437, No. 0, pp. 185-195. ISSN 0048-9697.

Sinclair C.d.; et al. A desk study on pesticide metabolites, degradation and reaction products to inform the inspectorates position on monitoring requirements. Final Report for Drinking Water Inspectorate. En: Food Environment Research Agency.2010

Snyder, Shane A. Occurrence, Treatment, and Toxicological Relevance of EDCs and Pharmaceuticals in Water. Ozone; Science and Engineering, 2008, vol. 30, No 1. pp. 65–69.

Sohoni P y Sumpter J, 1998. Several environmental estrogen are also endrogens. J. Endocrinol. 158: 327-339.

Tixier C, Singer H, Ollers S, Muller S, 2003. Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clorfibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters. Environ. Sci. Technol. 37: 1061-1068.

Toledano, M. B.; et al. Relation Trihalomethane concentrations in public water supplies to stillbirth and birth weight in three water regions in England. En: Environ. Health Perspect. 2005. Vol. 113. No 2, p. 225-232.

Torres-Duarte, C.; Viana, M. Vazquez-Duhalt, R. Laccase Mediated Transformations of Endocrine Disrupting Chemicals Abolish Binding Affinities to Estrogen Receptors and Their Estrogenic Activity in Zebrafish. Appl. Biochem. Biotechnol. 168: 864-876 (2012)

Torres, E. Ayala, M. Biocatalysis based on heme peroxidases, Ed. Springer P. 325 Germany, (2010) eduardo.torres@correo.buap.mx

Torres, E.; Bustos-Jaimes, I. Le Borgne, S. Potential use of oxidative enzymes for the detoxification of organic pollutants. Appl. Catal. B. 46: 1-15. (2003)

United Nations Environmental Programme. Environmental Health Criteria 181. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc181.htm>

VALCARCEL, Y., et al. Detection of Pharmaceutically Active Compounds in the Rivers and Tap Water of the Madrid Region(Spain) and Potential Ecotoxicological Risk. *Chemosphere*, 2011, vol. 84, No. 10, pp. 1336-1348.

Vieno N, Tuhkanen T y kronberg L, 2006. Removal of pharmaceuticals in drinking water treatment: effect of chemical coagulation. *Env. Technol.*, 27: 183-192.

Villagrasa M, Lòpez de Alda M, Barcelò D (2006) *Anal. Bioanal. Chem.* 386,953.

Vymazal. J., Brix, H., Cooper, P. F., Green. M. B., and Haberl, R. (eds.) (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden. The Netherlands.

Waller, k.; et al. Influence of exposure assessment methods on risk estimates in an epidemiologic study of total trihalomethanes exposure and spontaneous abortion. *En: Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2001. Vol. 11. No 2, p. 522-531.

Wen, X.; Jia, Y. Li, J. Enzymatic degradation of tetracycline and oxytetracycline by crude manganese peroxidase prepared from *Phanerochaete chrysosporium*. *J. Hazard. Mater.*177: 924-928. (2010)

Wen, X.; Jia, Y. Li, J. Degradation of tetracycline and oxytetracycline by crude lignin peroxidase prepared from *Phanerochaete chrysosporium*- A white rot fungus. *Chemosphere*.75:1003-1007. (2009)

Westerhoff P, Yoon Y, Snyder S. y Wert E, 2005. Fate of endocrine-disrupter, pharmaceuticals and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment process, *Env. Sci. Technol.* 39: 6649-6663.

WHO.IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Geneva: World Health Organization, 1990.

Witte W, 1998. Medical consequences of antibiotic use in agriculture. *Science*, 279: 966-997. Zwiener C y Frimmel F, 2000. Oxidative treatment of pharmaceuticals in water. *Water Res.* 34: 1881-1897. quimicaviva@qb.fcen.uba.ar

NOM-127-SSA1-1994-Gobierno/gob.mx

www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html

Woolhause and Sonya, J., Contaminantes Emergentes: Aspectos químicos microbiológicos y de salud. Primera edición. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012, 23PP.