

CIENCIAS DEL AGUA: perspectiva desde la academia

María del Carmen Jiménez Moleón ✦ José Luis Expósito Castillo
Marivel Hernández Téllez ✦ Miguel Ángel Gómez Albores

Coords.



CIENCIAS DEL
A G U A:
perspectiva desde la academia



**Universidad Autónoma
del Estado de México**

Dr. en Ed. Alfredo Barrera Baca
Rector

Dr. en C. I. Amb. Carlos Eduardo Barrera Díaz
Secretario de Investigación y Estudios Avanzados

Dr. en Ing. Daury García Pulido
Coordinador del Centro Interamericano de Recursos del Agua

Dra. en Ing. María Dolores Durán García
Directora de la Facultad de Ingeniería

Mtra. en Admón. Susana García Hernández
*Directora de Difusión y Promoción de la Investigación
y los Estudios Avanzados*



CIENCIAS DEL
AGUA:
perspectiva desde la academia

María del Carmen Jiménez Moleón ✎ José Luis Expósito Castillo
Marivel Hernández Téllez ✎ Miguel Ángel Gómez Albores

Coords.

CIENCIAS DEL A G U A: perspectiva desde la academia

María del Carmen Jiménez Moleón
José Luis Expósito Castillo
Marivel Hernández Téllez
Miguel Ángel Gómez Albores

Coords.

1a edición, febrero de 2018

ISBN: 978-607-422-910-3
ISBN versión digital: 978-607-422-909-7

D. R. © Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Literario núm. 100 ote.
Centro, C.P. 50000,
Toluca, Estado de México
<http://www.uaemex.mx>

Este libro cuenta con el aval de dos pares externos.

El contenido de esta publicación es responsabilidad de los autores.

En cumplimiento del Reglamento de Acceso Abierto de la Universidad Autónoma del Estado de México, la versión digital de esta obra se pone a disposición del público en el repositorio de la UAEM (<http://ri.uaemex.mx>) para su uso en línea con fines académicos y no de lucro, por lo que se prohíbe la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de esta presentación impresa sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito de los editores, en términos de lo así previsto por la *Ley Federal del Derecho de Autor* y, en su caso, por los tratados internacionales aplicables.

Impreso y hecho en México

Índice

Prólogo.....	11
I. Análisis de la carga por enfermedades diarreicas agudas en el Estado de México 2000-2011	13
Nancy Nájera Mota, Miguel Ángel Gómez Albores, Carlos Díaz Delgado, Marivel Hernández Téllez, Carlos Alberto Mastachi Loza, Ninfa Ramírez Durán y Luis Ricardo Manzano Solís	
II. Cultura del agua en la educación básica	33
José Luis Miranda Jiménez, Marivel Hernández Téllez, Miguel Ángel Gómez Albores, Alejandro Tonatiuh Romero Contreras, Denise Freitas Soares de Moraes, Martha Carolina Serrano Barquín, Carlos Alberto Mastachi Loza y Héctor Martínez Valdés	
III. Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Valle de Toluca mediante el método SINTACS	51
Jorge Paredes Tavares, María Vicenta Esteller Alberich y José Luis Expósito Castillo	
IV. Efecto del pH en la adsorción de un colorante textil usando materiales naturales y modificados	67
Perla Tatiana Almazán Sánchez, Ivonne Linares Hernández, Verónica Martínez Miranda y Marcos José Solache Ríos	
V. Electrosíntesis de oxidantes y su aplicación en la desinfección de aguas residuales. Parte I: Generalidades	87
Sarai Velazquez Peña, Ivonne Linares Hernández, Verónica Martínez Miranda e Iván Galileo Martínez Cienfuegos	
VI. Electrosíntesis de oxidantes y su aplicación en la desinfección de aguas residuales. Parte II: Metodología de la síntesis	105
Sarai Velazquez Peña, Ivonne Linares Hernández, Sergio Humberto Pavón Romero, Verónica Martínez Miranda e Iván Galileo Martínez Cienfuegos	

VII.	Fundamentos teórico metodológicos para un modelo hidrogeomático de indicadores sistémicos en un proceso de gestión integrada de recursos hídricos.....	123
	Luis Ricardo Manzano Solís, Miguel Ángel Gómez Albores, Carlos Díaz Delgado, Carlos Alberto Mastachi Loza, Marivel Hernández Téllez, Denise Freitas Soares de Moraes y Nancy Nájera Mota	
VIII.	Fundamentos y avances en la desinfección del agua residual	139
	Sarai Velazquez Peña, Ivonne Linares Hernández, María del Carmen Jiménez Moleón, Marina Islas Espinoza y Mercedes Lucero Chávez	
IX.	Implementación de escenarios hidrogeológicos para definir el diseño óptimo de una red de monitoreo del nivel piezométrico	157
	Juan Manuel Esquivel Martínez, María Vicenta Esteller Alberich, Guillermo Pedro Morales Reyes y José Luis Expósito Castillo	
X.	La protección de acuíferos. Un enfoque integral basado en la priorización de focos de contaminación.....	181
	Carolina Massiel Medina Rivas, José Luis Expósito Castillo, Guillermo Pedro Morales Reyes y María Vicenta Esteller Alberich	
XI.	Presencia de flúor y arsénico en agua y su remoción simultánea	203
	Guadalupe Vázquez Mejía, Verónica Martínez Miranda y Marcos José Solache Ríos	
XII.	Procesos de oxidación avanzada para la remoción de materia orgánica en las aguas residuales.....	221
	Perla Tatiana Almazán Sánchez, Ivonne Linares Hernández, Verónica Martínez Miranda y Marcos José Solache Ríos	
XIII.	Revalorización de lodos residuales: 1. Compostaje	241
	Adriana Fabiola Tello Andrade, María del Carmen Jiménez Moleón, Gloria Sánchez Galván, José Caballero Viñas y Cristina Burrola Aguilar	
XIV.	Revalorización de lodos residuales: 2. Vermicompostaje	261
	José Caballero Viñas, María del Carmen Jiménez Moleón, César Emmanuel García Mejía, Mercedes Lucero Chávez y Adriana Fabiola Tello Andrade	

XV. Sistema de modelos termohidrológicos para la evaluación de la eficiencia en el aprovechamiento de recursos hídricos	279
Carlos Díaz Delgado, María Vicenta Esteller Alberich y Carlos Roberto Fonseca Ortiz	
XVI. Sorción de iones fluoruro en columna: fundamentos y materiales	299
Elia Alejandra Teutli Sequeira, Guadalupe Candelaria Velázquez Peña, Marcos José Solache Ríos y Verónica Martínez Miranda	
XVII. Tratamiento de un agua residual industrial en un reactor UASB (laboratorio) a baja temperatura	319
Adriana Jacobo López, Mario Esparza Soto y Mercedes Lucero Chávez	

Capítulo VIII

Fundamentos y avances en la desinfección del agua residual

Sarai Velazquez Peña^{1*}
Ivonne Linares Hernández²
María del Carmen Jiménez Moleón²
Marina Islas Espinoza²
Mercedes Lucero Chávez²



* Autora de correspondencia.

¹ Alumna del Doctorado en Ciencias del Agua del Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México. Correo electrónico: sarai.velazquez@yahoo.com.mx

² Profesoras-Investigadoras del Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México. Correos electrónicos: ilinaresh@uaemex.mx, mcjimenezm@uaemex.mx, mislase@uaemex.mx y mluceroc@uaemex.mx

Introducción

En la actualidad se considera que los procesos de desinfección del agua implican un tratamiento especializado, dirigido a la destrucción de organismos perjudiciales o simplemente indeseables. La supervivencia de los organismos que puedan existir en el agua depende de factores ambientales, fisiológicos y morfológicos, entre los que destacan: pH, presencia/ausencia de oxígeno, suministro de nutrientes, competencia con otros organismos, resistencia a agentes tóxicos, entre otras. La capacidad de estos organismos al provocar enfermedades en el hombre depende de su actividad y concentración, así como de la forma de contacto (uso y/o consumo del recurso hídrico contaminado) y de la resistencia del organismo ante el agente patógeno. Por este motivo, surge la necesidad de desarrollar alternativas que promuevan la distribución y uso confiable del recurso hídrico.

El presente capítulo tiene como fin ser una herramienta útil para identificar las características microbiológicas de los microorganismos que son capaces de afectar la salud del hombre y los aspectos que influyen en la selección apropiada de un buen agente desinfectante, de tal forma que se garantice la calidad microbiológica del agua en un uso subsiguiente.

También se abordarán los métodos generales por los cuales se lleva a cabo el proceso de desinfección (métodos físicos y químicos), destacando dentro de los métodos químicos las características del empleo de la cloración, así como de la incorporación de métodos de desinfección

alternativos: ozono solo o combinado con peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio, plata y cobre, solos o combinados, ferratos, entre otros. En cuanto a la aplicación de los métodos físicos de desinfección, se desarrollarán a lo largo del texto las características de los procesos más comúnmente empleados, entre los que destacan la radiación ultravioleta y la incorporación de un nuevo método físico como el ultrasonido, así como tratamientos físico-químicos que promueven la desinfección, por ejemplo, la elevación del pH.

Indicadores de contaminación microbiológica

El reconocimiento de la existencia de infecciones microbianas transmitidas por el agua ha obligado a controlar la calidad microbiológica y a afinar los métodos para detectar los organismos patógenos presentes. Los métodos que se aplican para su aislamiento y cuantificación son, en su mayoría, largos y complejos, por lo que se han buscado microorganismos cuya presencia no constituya un riesgo para la salud pública y permitan detectar una contaminación por materias fecales. Estos microorganismos, llamados indicadores o gérmenes testigos, señalan la presencia de organismos patógenos. Para poder llevar a cabo el control bacteriológico del agua, los indicadores bacterianos, que deben de ser monitoreados, comprenden a los coliformes totales y fecales, los estreptococos fecales y los clostridium sulfito-reductores. En general, los gérmenes indicadores se dividen en dos grupos principales: los indicadores de contaminación, que permiten apreciar el riesgo de una eventual contaminación por microorganismos patógenos, y los indicadores de la eficiencia del tratamiento de desinfección, que permiten evaluar la calidad de un tratamiento hacia los microorganismos patógenos contenidos en el agua. Los gérmenes testigos, para ser buenos indicadores de la presencia eventual de patógenos, deben de permitir un buen factor de seguridad para su aplicación (Regula *et al.*, 2014: 325-365; Gehra *et al.*, 2003: 4573-4586; Amiri, Mesquita y Andrew, 2010: 845-853).

Gérmenes indicadores de contaminación fecal

Los gérmenes testigo que permitan la identificación de contaminación fecal deben de cumplir con las siguientes características para su selección (Metcalf y Eddy, 1996:1033): a) deben estar presentes en materia fecal y

deben estar ausentes en agua no contaminada, b) no debe sobrevivir y multiplicarse en el medio natural, sin embargo, debe de ser mucho más resistente que los patógenos responsables de las enfermedades hídricas, c) deben tener una resistencia a la depuración natural del agua, de la misma manera que el patógeno del cual es trazador, d) deben estar presentes en número mucho más importante que el patógeno, a fin de poder extrapolar los resultados obtenidos sobre un litro de agua al volumen total de un contenedor y e) deben ser fáciles de aislar, identificar y contar en un tiempo lo más corto posible, actualmente, esos tiempos varían de 24 a 48 horas, promoviendo un control de riesgo a corto plazo (Metcalf y Eddy, 1996: 1217).

Dentro de los organismos que destacan como indicadores frecuentes de contaminación fecal encontramos: *Escherichia coli* (indicador de coliformes fecales (CF) y los estreptococos fecales (EF), lo cual permite establecer una relación de EF:CF para indicar el origen de la contaminación fecal. Una contaminación fecal de origen humano determina un valor igual o menor de 0.5, mientras que, para una contaminación fecal de origen animal debe de ser inferior o igual a 2.0 (Abdullah *et al.*, 2009: 806-811; Doederer *et al.*, 2014: 218-228).

Gérmenes indicadores de la eficacia del tratamiento

Dentro de los procesos de tratamiento para la eliminación de patógenos, el germen testigo deberá presentar por lo menos la misma sensibilidad a las características de los patógenos presentes al efluente a tratar, sin embargo, una mayor resistencia permitirá un mejor desempeño. La evaluación del proceso de desinfección se hace mediante el seguimiento de microorganismos de prueba o test. En el agua puede existir una variación muy importante entre el número de quistes, virus, esporas, pero también de bacterias. Las diversas bacterias coliformes (fecales o no) presentan sensibilidades próximas a la de los gérmenes patógenos (Metcalf y Eddy, 1996: 1217). Los estreptococos fecales son netamente más resistentes a la acción de los desinfectantes (particularmente a cloro) que ciertos patógenos como la *Salmonella*. Es extremadamente difícil contar con información relativa a la acción de cada desinfectante sobre cada especie o cada colonia de organismo patógeno. En la literatura, los principales datos que se encuentran son sobre bacterias u otros organismos modelo (Metcalf y Eddy, 1996: 1217). Los coliformes han servido como indicadores de estado de contaminación fecal, pero también se utilizan como modelos

de desinfección de los patógenos entéricos. Por ejemplo, a pH mayor a 8.5 todas las colonias de *E. coli* son más resistentes al cloro que las colonias de *Salmonella typhi*. En particular, *E. coli* es mucho más sensible a los bactericidas oxidantes que los virus, los quistes y las esporas (Labas, Martín y Cassano, 2005: 87-97). Debido a ello se introdujeron los estreptococos fecales como gérmenes testigos, quienes además de ser indicadores de contaminación fecal son también buenos testigos de la eficiencia del tratamiento de desinfección. También se han introducido las esporas *Clostridium* sulfito-reductores que son buenos indicadores de retención física de gérmenes (filtración) (Regula *et al.*, 2014: 325-365; Lyon *et al.*, 2012: 4653-4664).

Otros microorganismos propuestos como modelos son las levaduras: *Candida parapsilosis* o bacterias ácidas y los *Mycobacterium* y *Mycobacterium pheci*. Estos organismos son más resistentes al cloro que los virus y las bacterias entéricas. En cuanto a los protozoarios enquistados, el organismo modelo aún no ha sido definido (Hulsmans *et al.*, 2010: 1004-1009). El principal interés de tener modelos es poder comparar la acción de diferentes agentes químicos durante la inactivación de los mismos. La desventaja que existe al emplear microorganismos modelo se centra en las condiciones fisicoquímicas en las que se desarrollan a nivel laboratorio y la carencia de la misma resistencia de aquellos que se encuentran en el ambiente.

Características de un buen desinfectante

Una vez determinados los modelos para indicar la eficiencia de la desinfección, es necesario seleccionar el tipo de desinfectante a aplicar. El ideal deberá tener las siguientes características: eficiencia biocida para amibas, bacterias y virus, ausencia de subproductos tóxicos del desinfectante (trihalometanos para la cloración, clorito para la desinfección con dióxido de cloro, aldehído o carbono orgánico bioasimilable para la ozonación, bromatos por ozonación de aguas que contienen bromuros, entre otros), ausencia de propiedades peligrosas para humanos y otras formas de vida, fácil de manejar y aplicar, así como bajos costos de operación e inversión (Watson, Farré y Knight, 2012: 276-298). La desinfección puede realizarse mediante dos tipos de procesos o sistemas: agentes químicos (desinfección química) y agentes no químicos (desinfección física). En la desinfección química se

emplean una gran variedad de agentes químicos, entre los que se encuentran: halógenos (cloro, bromo, yodo), oxidantes fuertes (ozono o sus combinaciones, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno sólo o con sus combinaciones con radiación UV, cloro, plata o cobre) y otros compuestos (aldehídos, metales pesados: plata, cobre, o sus combinaciones) (Agolini *et al.*, 2001: 213-281; Francy *et al.*, 2012: 4164-4178).

Los desinfectantes se pueden clasificar según su acción en dos tipos: a) procesos que eliminan los microorganismos y b) procesos que los retienen. Dentro de ésta última categoría se pueden agrupar los procesos de membrana y los procesos de filtración lenta. En los procesos que eliminan los microorganismos, los modos de acción durante la desinfección pueden ser de acuerdo con cinco tipos de mecanismos (Amiri, Mesquita y Andrews, 2010: 845-853; Metcalf y Eddy, 1996: 1033; Abdullah *et al.*, 2009: 806-811): a) destrucción de los sistemas celulares mediante un daño a la pared celular, b) alteración de la permeabilidad de la pared celular, lo que provoca una liberación de nutrientes, c) alteración de la naturaleza coloidal de la célula mediante coagulación por calor o desnaturalización por ácidos o bases, d) inhibición de la actividad enzimática produciendo una desactivación del proceso metabólico y e) alteración del material proteínico provocando una desactivación de la capacidad infecciosa (interferencia sobre la biosíntesis o la reproducción).

Para los mecanismos de desinfección mencionados anteriormente, las etapas más importantes son dos: contacto del desinfectante con la pared celular del organismo a destruir y difusión a través de la pared celular.

Factores que influyen en el proceso de desinfección

Concentración y tipo de agente químico

Cuando se emplean oxidantes como agentes químicos, se deben tomar en cuenta dos parámetros importantes (Doederer *et al.*, 2014: 218-228):

- a) Potencial de óxido-reducción del oxidante. Mientras más elevado sea éste, mayor será la capacidad de dañar la pared celular y, por lo tanto, la podrá romper más fácilmente. La tabla VIII.1 presenta los potenciales estándar de los principales desinfectantes empleados en el tratamiento de agua (Metcalf y Eddy, 1996: 1217-1438; Jiang y Lloyd, 2002: 1397-1408).

Tabla VIII.1. Potenciales estándar de óxido reducción de algunos agentes químicos utilizados en el tratamiento de agua residual

Compuesto	Fórmula	Potencial de oxidación (volts)
Cloro	Cl ₂	1.36
Bromo	Br ₂	1.09
Yodo	I ₂	0.54
Ozono	O ₃	2.97
Dióxido de cloro	ClO ₂	0.95
Hipoclorito	ClO ⁻	1.482
Perclorato	ClO ₄ ⁻	1.389
Permanganato	MnO ₄ ⁻	1.679
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	1.776
Ferrato (VI)	FeO ₄ ²⁻	2.20

Fuente: Jiang y Lloyd (2002: 1397-1408).

Con base en esos valores, los desinfectantes pueden clasificarse en orden decreciente de poder oxidante en: O₃>Cl⁻>Br>ClO₂>I. La difusión a través de la membrana del microorganismo depende del tamaño de la molécula y de la carga de la molécula. Debido a lo anterior, el efecto desinfectante de los agentes oxidantes dependen de la carga que presentan y de la carga de los microorganismos, por ello, las bacterias que presentan un pH cercano a la neutralidad están cargadas negativamente, lo que explica que una molécula neutra sea más reactiva en relación con el poder oxidante y por ende al poder de desinfección en comparación de un agente desinfectante en forma ionizada negativa, debido a que éste último será repulsado por la bacteria, como es el caso formas HOCl que son más reactivas que la forma ionizada OCl⁻. Por otra parte, la clasificación en relación con el efecto desinfectante para los halógenos será por consiguiente inversamente proporcional a su poder oxidante: I⁻>Br>Cl.

- b) Resistencia de los microorganismos a los tratamientos de desinfección. Los patógenos se pueden clasificar en orden decreciente de acuerdo con su resistencia a los tratamientos de desinfección en cuatro grupos principales: esporas de bacterias, quistes de protozoarios, virus y bacterias libres (Diao *et al.*, 2004:1421-1426). La resistencia relativa a la desinfección de estos microorganismos se atribuye a diferencias que tienen en su cito-estructura. La deshidratación parcial de las esporas puede ser una causa de fuerte resistencia, esto ocurre también en el caso de los quistes. La gran resistencia de los virus se atribuye a la ausencia de enzimas y otros sistemas sensibles por lo que su inactivación se logra mediante la desnaturalización de proteínas de la cápsula (Diao *et al.*, 2004: 1421-1426; Gehra *et al.*, 2003: 4573-4586).

Efecto de temperatura, pH y turbiedad durante el efecto de desinfección

La temperatura del agua tendrá una influencia sobre la cinética de difusión del desinfectante, a través de la membrana de los microorganismos. En el caso de los oxidantes, toda molécula reductora (hierro (II), manganeso divalente, sulfuros, nitritos, materias orgánicas oxidables, amoníaco, nitrógeno orgánico), o que pueda combinarse con el oxidante, será apta a disminuir o bloquear el efecto de desinfección del reactivo. El pH del agua influye en la repartición de las diferentes especies oxidantes y la cinética de degradación de la molécula. La turbiedad del agua también influye de manera significativa sobre la desinfección. Cada uno de estos parámetros influye en el proceso de desinfección en diferente grado según el tipo de agente de desinfección aplicado (Amiri, Mesquita y Andrews, 2010: 845-853).

Factor Ct (concentración-tiempo de contacto)

El factor Ct es uno de los parámetros más importantes para determinar o predecir la eficiencia desinfectante de cualquier agente empleado para tal fin. Está definido como el producto de la concentración (C) del desinfectante en mg/L y el tiempo de contacto (t), en minutos, requerido para inactivar cierto porcentaje de la población de microorganismos presentes en el agua, bajo condiciones específicas de pH y temperatura. En la tabla VIII.2 se resume el factor Ct para diversos microorganismos mediante

diversas técnicas de desinfección presentes en agua residual (Metcalf y Eddy, 1996: 1033).

Tabla VIII.2. Valores de Ct para la inactivación de diferentes microorganismos

Microorganismo	Ozono	Cloro libre	Dióxido de cloro
<i>E. coli</i>	0.02 mg/L min	0.03-0.05 mg/L min	0.4-0.75 mg/L min
Polivirus 1	0.1-0.2 mg/L min	1.1-2.5 mg/L min	0.2-6-7 mg/L min
Rotavirus	0.006-0.6 mg/L min	0.01-0.05 mg/L min	0.3-2.1 mg/L min
<i>Giardia lamblia</i>	0.005-0-6 mg/L min	47-150 mg/L min	26 mg/L min

Fuente: Metcalf y Eddy (1996: 1033).

Sistemas convencionales de desinfección química

Estos métodos son eficientes y rápidos, algunos de ellos generan efectos residuales que permiten la prevención de futuras proliferaciones de los microorganismos y los costos de aplicación son relativamente bajos. Existen varios tipos de agentes desinfectantes, los más utilizados son el cloro con sus derivados (Amiri, Mesquita y Andrews, 2010: 845-853; Francy *et al.*, 2012: 4164-4178) y ozono (Agolini *et al.*, 2001: 213-281; Gehra *et al.*, 2003: 4573-4586).

Cloración

La desinfección con cloro permite un óptimo rendimiento en términos de eliminación o inactivación de microorganismos patógenos. El cloro es un oxidante fuerte que además de desinfectar, provocando alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared celular, permite la remoción de color, hierro y manganeso, además, en ciertos casos reduce el sabor y olor presente en los efluentes. Dentro de un tren de tratamiento de agua la etapa de pre-cloración elimina las algas y otros compuestos formados en la etapa de sedimentación, permite el control de microorganismos que crecen en los filtros de arena. La pre-cloración también oxida la materia orgánica que interfiere o inhibe la coagulación-floculación, permitiendo mejorar este último proceso. Los derivados de cloro que se emplean para llevar a cabo la desinfección se diversifican en cloro gaseoso, los

hipocloritos de sodio y calcio y el dióxido de cloro; sin embargo, el cloro y sus derivados no permiten la eliminación de los virus y microorganismos, cuya presencia en medios acuosos son causa de muerte para el humano (Abdullah *et al.*, 2009: 806-811; Doederer *et al.*, 2014: 218-228). Además, se ha comprobado que los productos derivados de la cloración presentan un potencial carcinógeno para el ser humano, como es el caso de los trihalometanos (THM). Debido a lo anterior, se ha originado un gran interés por mejorar el proceso, evaluando el riesgo de éste para el ser humano, además de aplicar métodos de desinfección alternativos.

Este método de cloración puede llevarse a cabo usando tres diferentes fuentes de cloro (Lyon *et al.*, 2012: 4653-4664; Abdullah *et al.*, 2009: 806-811):

- Cloro gas (Cl_2), es un gas irritante, tóxico, más denso que el aire y de color verde amarillento. Al estar en contacto con el agua, se hidroliza rápidamente formando ácido hipocloroso y ácido clorhídrico; su aplicación aumenta la eficacia de la desinfección (ecuaciones (1) y (2)).



- Hipoclorito de sodio, en solución es un buen desinfectante. A nivel industrial se obtiene por reacción del cloro gas (ecuación (3)) con una solución de hidróxido de sodio, que al ser incorporado en el agua a tratar genera especies hidroxilo que promueven el rendimiento de desinfección.



- Hipoclorito granular, para su aplicación debe ser disuelto, contiene de un 20-70% de cloro activo, lo que lo hace un agente altamente germicida.

Las desventajas del uso del cloro y sus derivados es que al reaccionar con la materia orgánica da lugar a la formación de trihalometanos (THM), considerados compuestos tóxicos y carcinogénicos (Francy *et al.*, 2012:

4164-4178), otro inconveniente es la formación de clorofenoles lo que daría lugar a malos olores.

Para lograr la desinfección, se dosifica a niveles de concentraciones fijas establecidas de cloro activo, en cualquiera de sus diferentes formas (cloro gas, hipoclorito de sodio, hipoclorito granular), los cuales decrecen después de un periodo de contacto. Cabe mencionar que para producir el efecto desinfectante, el cloro dosificado sólo debe de ser consumido parcialmente. Es decir, luego del periodo de contacto debe de mantenerse un nivel adecuado de cloro residual. A esta variación, entre el nivel de cloro añadido luego de la dosificación y el nivel de cloro residual, se le denomina demanda de cloro. La demanda de cloro que ejerce una muestra de efluente a tratar se determina experimentalmente por el método de punto de quiebre. Dentro de los límites máximos permisibles en agua para uso y consumo humano, la NOM-127-SSA1-1994 establece un rango permisible de cloro residual libre de 0.2-1.5 mg/L, mismo que debe mantenerse en todo el sistema de distribución para obtener una adecuada desinfección. En la tabla VIII.3 se muestran dosis típicas de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y cloro gas en plantas de tratamiento de agua (Metcalf y Eddy, 1996: 1217). El modo de acción del cloro en los microorganismos se lleva a cabo por medio de dos tipos. Por un lado, afectación directa sobre la membrana y ocluye la permeabilidad, y por otro, altera las funciones celulares (daña enzimas y ácidos nucleicos). Por ello, la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas, así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo (Regula *et al.*, 2014: 325-365).

Tabla VIII.3. Dosis típica de cloro en plantas de tratamiento de agua residual

Compuesto de cloro	Rango de dosis (mg/L)
Hipoclorito de calcio	0.5-5
Hipoclorito de sodio	0.2-2
Cloro gas	1-1.6

Ozonación

El mecanismo de inactivación de la ozonación radica en el alto poder oxidante del ozono. La destrucción de agentes patógenos se produce directamente por la desintegración de la pared celular, debido a la generación de radicales libres. Esta condición convierte al ozono en un eficiente agente destructor de bacterias, quistes resistentes de bacterias, esporas, hongos y posiblemente sea igual de efectivo para la eliminación de virus (Algolini *et al.*, 2001: 213-281; Gehra *et al.*, 2003: 4573-4586; Diao *et al.*, 2004: 1421-1426). A diferencia del cloro, la capacidad desinfectante del ozono no depende del periodo de contacto en el agua, sino de la dosis suministrada. Esto se debe a que su alto poder oxidante produce inestabilidad del ozono, lo que quiere decir que quedará ozono remanente por corto tiempo. Dada su escasa permanencia, es importante determinar la demanda de ozono adecuadamente (Algolini *et al.*, 2001: 213-281). Al igual que el cloro, el ozono, inclusive por sí mismo, puede producir subproductos adversos para la salud humana, entre los que destaca la formación de aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos.

Sistemas convencionales de desinfección física y química

La desinfección física así como la desinfección química se efectúa mediante los principales procesos que se detallan a continuación.

Elevación del pH

Durante ciertas etapas de un tren de tratamiento, en particular la eliminación de calcio y magnesio por precipitación con carbonato de calcio o con hidróxido de magnesio, el pH del agua aumenta hasta 10.5 durante un prolongado tiempo. Varios estudios han demostrado que el aumento del pH puede producir efectos desinfectantes, bactericidas e incluso virucidas por la acción del elevado rango alcalino sobre la pared celular de los microorganismos. Para *Escherichia coli*, por ejemplo, a 20°C y un tiempo de contacto de 210 minutos, un pH de 10.5 permite eliminarla completamente (Metclaf y Eddy, 1996: 1033-1044; Francy *et al.*, 2012: 4164-4178). En la tabla VIII.4 se resumen los tiempos de contacto y condiciones de pH para la inactivación de microorganismos.

Tabla VIII.4. Tiempos de contacto necesarios a pH elevados para la inactivación de microorganismos presentes en el agua

pH	<i>Escherichia Coli</i> (minutos)	<i>Enterobacter aerogenes</i> (minutos)	<i>Psudomonas aeruginosa</i> (minutos)	<i>Salmonella typhy</i> (minutos)	<i>Shigela disenteriae</i> (minutos)
9.01-9.5	>540	-----	-----	>540	-----
9.51-10.0	>600	>600	420	>540	>300
10.01-10.5	>600	>540	300	240	180
10.51-11.0	600	>600	240	120	75

Fuente: Metclaf y Eddy (1996: 1033-1044)

Inactivación por radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes se pueden obtener por los rayos ultravioleta, rayos X o rayos gama. Se obtiene también a partir de partículas: α , β , neutrones, positrones y mesones. El mecanismo de desinfección por radiación es la destrucción del ADN. Para poder llevar a cabo la desinfección a través de este método es necesario aplicar dosis de 20 a 60 Gy (Gray) para obtener buenas eficiencias del proceso (Gehra *et al.*, 2003: 4573-4586; Algolini *et al.*, 2001: 213-281; Labas, Martín y Cassano, 2005: 87-97). La tabla VIII.5 presenta los efectos de los rayos ionizantes en función de las dosis aplicadas.

Tabla VIII.5. Efecto de la radiación en el proceso de desinfección

Dosis aplicada (Gy)	Efecto
5-10	Eliminación de la reproducción
10.01-100	Desinfección
100.1-1000	Pasteurización
1000.01- 5000	Esterilización

El proceso más común de desinfección por radiación es la radiación ultravioleta (UV), la acción desinfectante de los rayos UV se debe a que se generan radicales hidroxilo y peroxylo que son altamente oxidantes. La teoría principal que explica la acción desinfectante de los rayos UV es una alteración fotoquímica del ADN de los microorganismos. Sin embargo,

una de las desventajas que posee esta técnica es la regeneración de los daños ocasionados sobre la pared celular de los microorganismos a inactivar, mediante mecanismos de fotorreactivación enzimática en presencia o ausencia de luz de las propias células, se estima alrededor del 30% de sobrevivencia de microorganismos después de la aplicación de la radiación UV, es por ello que, existen combinaciones entre la radiación por UV con peróxido de hidrógeno y sales de plata para poder incrementar la tasa de eficiencia del sistema (Penru *et al.*, 2012: 40-45).

Desinfección por ultrasonido

A través de la técnica de ultrasonido en medio acuoso puede llevarse a cabo la formación de peróxidos que promueven la desinfección. Sin embargo, desde el punto de vista energético, la técnica presenta desventajas económicas debido a su bajo costo de operación. Con base en lo anterior, se ha logrado el desarrollo en sinergia con otros tratamientos, como es el caso de la combinación ultrasonido/ozono lo que permite lograr que el efecto oxidante del ozono en combinación con los peróxidos formados reduzcan el tiempo de contacto y aumente el efecto de desinfección durante el proceso. Por otro lado, se encuentra la combinación ultrasonido/UV lo que permite una separación de bacterias aglomeradas en el medio y un ataque directo sobre la estructura celular. Por último, la desinfección ultrasonido/peróxido de hidrógeno permite reducir las cinéticas de inactivación en comparación a las obtenidas individualmente (Hulsmans *et al.*, 2010; 1004-1009).

Desinfección por estrés mecánico

La influencia de las variaciones bruscas de presión, velocidad y temperatura, dentro de un tren de tratamiento de agua, provoca un estrés de los microorganismos presentes, esto favorece la eficacia de procesos físicos o químicos para llevar a cabo la desinfección (Metcalf y Eddy, 1996: 1217).

Desinfección electroquímica

El efecto desinfectante *in situ* de los métodos electroquímicos permiten una transferencia de electrones entre los microorganismos presentes en el medio de desinfección y la carga generada entre el cátodo de una celda electroquímica, ese contacto promueve la disminución de la actividad respiratoria de los microorganismos, mientras en el ánodo de la celda se

generan especies oxidantes por electrólisis (H_2O_2 y HClO) que coadyuvan al proceso de desinfección.

Los materiales de electrodo comúnmente empleados son grafito, películas de polímeros, titanio, platino, acero inoxidable, carbón poroso, plata, diamante dopado con boro. En la mayoría de los casos, el medio a desinfectar se enriquece con NaCl y NaBr para aumentar la eficiencia del proceso. La desinfección electroquímica permite eliminar aproximadamente una amplia diversidad de microorganismos entre los que destacan virus y bacterias.

Respecto a los métodos electroquímicos, hoy en día, para poder llevar con eficacia los procesos de desinfección, se han desarrollado metodologías que permiten la electrosíntesis *in situ* de agentes químicos con alto poder de oxidación, es decir, promueven la desinfección de efluentes con elevados rendimientos y compatibilidad ambiental y de salud pública, entre ellos destaca la electrogeneración de ferratos, persulfatos, percloratos, bromatos, peroxocarbonatos, entre otros (Velazquez-Peña *et al.*, 2013: 272-278; Racyte *et al.*, 2014: 70-76 ; Xu, Li y Dong, 2010: 204-210).

Conclusiones

Cada día se vuelve más relevante generar nuevas propuestas que permitan llevar a cabo el proceso de destrucción/inactivación de microorganismos dañinos, presentes en los recursos hídricos y, al mismo tiempo, promover una compatibilidad ambiental, minimizando los subproductos tóxicos después de su uso y así obtener una adecuada disposición de los efluentes según sea su uso.

Bibliografía

- Abdullah, M. P. *et al.* (2009). "The Study of Interrelationship Between Raw Water Quality Parameters, Chlorine Demand and the Formation of Disinfection by-products", en *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, pp. 806-811.
- Agolini G. *et al.* (2001). "The Use Ozone in Water and Air Disinfections", en *Ingeniería Moderna*, 115, pp. 213-281.

- Amiri, F., M. M. F. Mesquita y S. A. Andrews (2010). "Disinfection Effectiveness of Organic Chloramines, Investigating the Effect of pH", en *Water Research*, 44, pp. 845-853.
- Diao, H. F. et al. (2004). "Electron Microscopic Investigation of the Bactericidal Action of Electrochemical Disinfection in Comparison with Chlorination, Ozonation and Fenton Reaction", en *Process Biochemistry*, 39, pp. 1421-1426.
- Doederer, K. et al. (2014). "Factors Affecting the Formation of Disinfection by-products During Chlorination and Chloramination of Secondary Effluent for the Production of High Quality Recycled Water", en *Water Research*, 48, pp. 218-228.
- Francy, D. S. et al. (2012). "Comparative Effectiveness of Membrane Bioreactors, Conventional Secondary Treatment, and Chlorine and UV Disinfection to Remove Microorganisms from Municipal Wastewaters", en *Water Research*, 46, pp. 4164-4178.
- Gehra, R. et al. (2003). "Disinfection Efficiency of Paracetic Acid, UV and Ozone After Enhanced Primary Treatment of Municipal Wastewater", en *Water Research*, 37, pp. 4573-4586.
- Hulsmans, A. et al. (2010). "Evaluation of Process Parameters of Ultrasonic Treatment of Bacterial Suspensions in a Pilot scale Water Disinfection System", en *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, pp. 1004-1009.
- Jiang, J. Q. y B. Lloyd (2002). "Progress in the Development and Use of Ferrate(VI) Salt as an Oxidant and Coagulant for Water and Wastewater Treatment", en *Water Research*, 36, pp. 1397-1408.
- Labas, M. D., C. A. Martín y A. E. Cassano (2005). "Kinetics of Bacteria Disinfection with UV Radiation in an Absorbing and Nutritious Medium", en *Chemical Engineering Journal*, 114, pp. 87-97.
- Lyon, B. A. et al. (2012). "The Effect of Inorganic Precursors on Disinfection Byproduct Formation During UV-chlorine/chloramine Drinking Water Treatment", en *Water Research*, 46, pp. 4653-4664.
- Metcalf y Eddy (1996). *Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Ingeniería de aguas residuales*, 4a ed., McGraw Hill, México, pp.1033-1044 y 1217-1438.
- 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. México: 18 de enero de 1996 y modificada el 22 de Noviembre del 2000. *Diario Oficial de la Federación*.

- Penru, Y. *et al.* (2012). "Application of UV and UV/H₂O₂ to Seawater: Disinfection and Natural Organic Matter Removal", en *Journal of Photochemistry and Photobiology a: Chemistry*, 233, pp. 40-45.
- Racyte, J. *et al.* (2014). "Alternating Electric Field Fluidized Bed Disinfection Performance with Different Types of Granular Activated Carbon", en *Separation and Purification Technology*, 132, pp. 70-76.
- Regula, C. *et al.* (2014). "Chemical Cleaning/disinfection and Ageing of Organic UF Membranes: A review", en *Water Research*, 56, pp. 325-365.
- Velazquez-Peña, S. *et al.* (2013). "Production of Oxidants Via Electrolysis of Carbonate Solutions with Conductive-diamond Anodes", en *Chemical Engineering Journal*, 230, pp. 272-278.
- Watson, K., M. J. Farré y N. Knight (2012). "Strategies for the Removal of Halides from Drinking Water Sources, and Their Applicability in Disinfection by-Product Minimisation: A Critical Review", en *Journal of Environmental Management*, 110, pp. 276-298.
- Xu, W., P. Li y B. Dong (2010). "Electrochemical Disinfection Using the Gas Diffusion Electrode System", en *Journal of Environmental Sciences*, 22, pp. 204-210.