



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**DESINFECCIÓN DE *ESCHERICHIA COLI* EN  
MUESTRAS FORTIFICADAS DE AGUA MEDIANTE  
FOTO-FENTON**

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERA AMBIENTAL**

PRESENTA  
**INGRID IVONNE CONSTANTINO SERRATO**



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
**SERVICIOS ESCOLARES  
TITULACIONES**

DIRECTOR

**DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UUH**



ASESORES

**Q. F. B. TERESA AURORA MARTÍN ESCOBAR  
BIOL. MARICRUZ MORENO CÁRDENAS  
M. C. JOSÉ MARTÍN RIVERO RODRÍGUEZ  
M. I. A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2015



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL  
PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA COMO REQUISITO PARA  
OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERA AMBIENTAL**

**COMITÉ DE TESIS**

**DIRECTOR:**

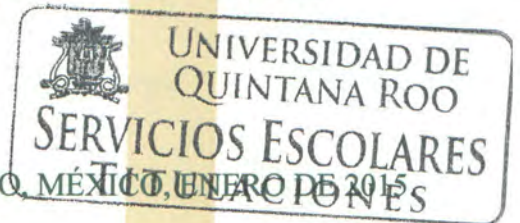
**DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UUH**

**ASESORA:**

**Q. F. B. TERESA AURORA MARTÍN ESCOBAR**

**ASESORA:**

**BIOL. MARICRUZ MORENO CÁRDENAS**



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2015

*A mi madre, quien siempre me ha  
inspirado, guiado y motivado*

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es el resultado de múltiples esfuerzos, de personas e instituciones, que sin su ayuda, conocimiento y apoyo no se hubiera podido lograr, por ello deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar a la persona que me ha guiado e impulsado, mi madre Olivia Serrato Ramírez, que sin su apoyo, ejemplo y sacrificio no me hubiese sido posible llegar a este punto de mi vida y a mis tíos Rodolfo, María Eugenia Serrato y Gener Corona, quienes han sido mis más grandes ejemplos a seguir.

Quiero agradecer también a mi director y asesores del presente trabajo, el Dr. José Alfonzo Canché Uuh, por motivarme a realizar un trabajo de investigación básica, por la paciencia, los comentarios, sugerencias y correcciones para mejorar. A la Q. F. B. Teresa Martín Escobar, por las facilidades otorgadas para la fase experimental del trabajo y sus comentarios que me ayudaron a mejorar, la Biol. Maricruz Moreno por su asesoría, paciencia y guía en el área microbiológica. Y a los maestros de ingeniería ambiental, quienes me guiaron e influyeron con sus lecciones y experiencias para formarme como una persona de bien y una profesionista preparada para los retos a los que me enfrentaré.

A mis amigos David Aburto, Karina Herrera, Mtro. Luis Miguel Román, Prof. José Ángel Modesto, Ana Cecilia Iuit, Armando León y Diego Canul, que me apoyaron y alentaron a continuar en las situaciones difíciles, gracias por permitirme ser parte de sus vidas e inspirarme.

Este trabajo fue financiado en la convocatoria de Apoyo a la titulación de la DCI, división a la cual le agradezco el apoyo otorgado, el cual me facilitó los traslados para la experimentación. Al PROMEB por el que fue posible la compra de los reactivos y al personal del LEPSQROO quienes amablemente me orientaron y apoyaron durante mi estancia en el laboratorio.

A todos ustedes, gracias.





## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se estudió una alternativa para complementar el proceso de desinfección durante el tratamiento de agua potable, el objetivo principal fue evaluar la eficiencia de la desinfección de *Escherichia coli* en muestras de concentración conocida, utilizando el proceso Foto-Fenton en un Colector Parabólico Solar (CPC) modificado, empleando como fuente de Fe (III) el alambre recosido utilizado para la construcción.

Se prepararon muestras de agua con una concentración de 86 UFC/l de *Escherichia coli*, utilizando un litro para el proceso Foto-Fenton y otro como blanco. Se determinaron diferentes pesos para el alambre recosido y diferentes concentraciones molares para el peróxido de hidrógeno y mediante la comparación de resultados, determinar la dosis ideal de peróxido y el peso óptimo de alambre recosido a emplear, sin embargo se encontró que en la concentración más baja contemplada en el trabajo 2.5 gramos de alambre y 0.001M de peróxido de hidrógeno, se eliminó por completo la muestra contaminada por *Escherichia coli*, las pruebas se realizaron a 4 diferentes tiempos de exposición en donde el resultado siempre fue el mismo para todas las pruebas.

Por lo tanto se concluyó que el porcentaje eficiencia para la desinfección de la bacteria *Escherichia coli* empleando un CPC modificado mediante el proceso Foto-Fenton y para las condiciones ambientales presentadas en la ciudad de Chetumal, es del 100% de eliminación bacteriana. El peso óptimo para alcanzar este porcentaje de desinfección del alambre recosido, en el cual está contenido el Fe (III), es de 2.5 gramos y la dosis ideal de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es de 0.001M, con un tiempo de exposición solar de 30 minutos bajo condiciones ambientales con cielo despejado.

**PALABRAS CLAVES:** Desinfección; Agua; Foto-Fenton; *Escherichia coli*; Procesos de oxidación avanzada; Agua potable; Potabilización; Microbiología.

## Glosario de Abreviaturas

OMS	Organización Mundial de la Salud
POAs	Procesos de Oxidación Avanzada
CPC	Colector Parabólico Compuesto
PET	Tereftalato de Polietileno
SODIS	Solar Water Disinfection
SS	Sólidos Suspendidos
COD	Carbono Orgánico Disuelto
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
SPDs	Subproductos de la Desinfección
THM	Trihalometanos
UTN	Unidades de Turbiedad Nefelométricas
OD	Oxígeno Disuelto
MO	Materia Orgánica
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
CT	Coliformes Totales
CF	Coliformes Fecales
NMP	Número Más Probable
MF	Membrana Filtrante
SPC	Subproductos de la Cloración
AHA	Ácidos Haloacéticos
HANs	Haloacetronitrilos
EPA	Environmental Protection Agency
LESPQROO	Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Quintana Roo



## CONTENIDO

<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b> .....	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>CAPÍTULO I: Aspectos Generales</b>	
1.1 Introducción .....	10
1.2 Antecedentes .....	12
1.3 Objetivo General .....	14
1.4 Objetivos Particulares .....	14
1.5 Justificación .....	15
<b>CAPÍTULO II: Marco Referencial</b>	
2.1 Fuentes de Agua .....	17
2.1.1 Fuentes convencionales .....	17
2.1.2 Fuentes no convencionales .....	18
2.2 Características del Agua .....	19
2.2.1 Propiedades físicas del agua .....	19
2.2.2 Propiedades químicas del agua .....	22
2.3 Microbiología del agua. ....	28
2.3.1 Tipos de Microorganismos .....	28
2.3.1.1 Bacterias .....	29
2.3.2 Contaminación de agua y bacterias indicadoras de contaminación .....	35
2.4 <i>Escherichia coli</i> .....	38
2.4.1 Medio y Reproducción .....	38
2.4.2 Patogenicidad .....	40
2.5 Legislación Ambiental Aplicable .....	45
2.6 Potabilización de Agua .....	47
2.6.1 Descripción completa del proceso .....	47
2.6.2 Desinfección .....	49
2.6.3 Teoría de la desinfección .....	50
2.6.4 Medios de Desinfección .....	53
2.6.5 Cloración .....	58
2.6.6 Aspectos toxicológicos de la cloración .....	62
2.7 Energía Solar .....	66
2.8 Colectores Solares .....	68
2.9 Procesos de Oxidación Avanzada .....	71
2.9.1 Foto-Fenton .....	73
<b>CAPITULO III: Metodología</b>	
3.1 Metodología Analítica .....	77

3.1.1	Diseño del experimento	77
3.1.2	Verificación de Micropipeta	81
3.1.3	Preparación de las muestras fortificadas	82
3.1.4	Construcción e instalación del CPC	83
<b>3.2</b>	<b>Descripción del Proceso</b>	<b>86</b>
3.2.1	Medición de temperatura y pH	86
3.2.2	Método de Filtración por Membrana	87
<b>CAPITULO IV: Análisis de Resultados</b>		<b>90</b>
<b>CAPITULO V: Conclusiones</b>		<b>96</b>
<b>Consulta bibliográfica</b>		<b>97</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1:</b> Diagrama esquemático de una célula bacteriana típica	30
<b>Figura 2.2:</b> Curva representativa de crecimiento bacteriano	34
<b>Figura 2.3:</b> Fotografías electrónicas de <i>E. blattae</i> , <i>E. coli</i> , <i>E. fergusonii</i> , <i>E. herman</i> y <i>E. vulneris</i>	39
<b>Figura 2.4:</b> Esquema del ciclo de vida de la <i>Escherichia coli</i>	40
<b>Figura 2.5:</b> Localización de los antígenos O, K y H de la <i>Escherichia coli</i>	41
<b>Figura 2.6:</b> Esquemas de la Patogenicidad de los patotipos intestinales de <i>Escherichia coli</i>	44
<b>Figura 2.7:</b> Planta de coagulación y filtración convencional para remoción de color, turbidez y microorganismos	49
<b>Figura 2.8:</b> Planta para un suministro pequeño con agua cruda de buena calidad	49
<b>Figura 2.9:</b> Espectro Radiación UV	54
<b>Figura 2.10:</b> Método SODIS	55
<b>Figura 2.11:</b> Cantidades relativas de HOCl y OCl <sup>-</sup> en diferentes valores de pH	59
<b>Figura 2.12:</b> Curva generalizada del punto de ruptura o break point	60
<b>Figura 2.13:</b> Formas importantes del cloro en el agua	61
<b>Figura 2.14:</b> Espectro de radiación electromagnética	66
<b>Figura 2.15:</b> Región ultravioleta del espectro electromagnético	67
<b>Figura 2.16:</b> Reflexión sobre un reactor CPC: toda la luz que llega a la apertura del captador será reflejada alrededor del reactor si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de aceptación del CPC	69
<b>Figura 2.17:</b> Curva de captación de un CPC	70
<b>Figura 2.18:</b> Mecanismo de reacción Foto-Fenton	74
<b>Figura 2.19:</b> Diagrama del proceso de fotocatalisis con microorganismos	75

### **CAPÍTULO III**

<b>Figura 3.1:</b> Alambre recocido utilizado en el trabajo.	77
<b>Figura 3.2:</b> Pesaje del alambre recocido	78
<b>Figura 3.3:</b> Alambre recocido en los vasos de precipitado	78
<b>Figura 3.4:</b> Disoluciones para encontrar la fase estacionaria	83
<b>Figura 3.5:</b> Componentes del Colector Parabólico Solar	84
<b>Figura 3.6:</b> Filtro comercial adaptado al Colector Parabólico Solar	85
<b>Figura 3.6:</b> Colector Parabólico Solar	85
<b>Figura 3.7:</b> Embudos y colector de aluminio	87

### **CAPÍTULO IV**

<b>Figura 4.1:</b> Resultados de la filtración por membrana de la muestra expuesta a 2 horas de radiación	92
<b>Figura 4.2:</b> Comparación de resultados de la filtración por membrana de la muestra expuesta a 2 horas de radiación entre los medios m-coliBlue y m-Endo	93
<b>Figura 4.3:</b> Comparación entre el blanco y la muestra tratada	93
<b>Figura 4.4:</b> Resultados de las muestras sometidas a 1 hora de proceso	94
<b>Figura 4.5:</b> Comparativa de resultados entre el blanco y la muestra tratada durante 30 minutos en el proceso	94

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Olores y Sabores típicos de las aguas de acuerdo a su origen	21
<b>Tabla 2.2:</b> Límites permisibles de la calidad del agua para consumo humano: características físicas y organolépticas, máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994	21
<b>Tabla 2.3:</b> Límites permisibles de la calidad del agua para consumo humano. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994	27
<b>Tabla 2.4:</b> Diferencias entre células eucariotas y procariotas	29
<b>Tabla 2.5:</b> Medios de cultivo, temperaturas y tiempos de incubación, y color de las colonias de algunas bacterias indicadoras de contaminación	37
<b>Tabla 2.6:</b> Grupos de <i>Escherichia coli</i> patógenos según su mecanismo para enfermar	42
<b>Tabla 2.7:</b> Marco Jurídico Federal y Estatal	45
<b>Tabla 2.8:</b> Normas Oficiales Mexicanas	46
<b>Tabla 2.9:</b> Procesos unitarios en función de los contaminantes presentes en el agua cruda	47
<b>Tabla 2.10:</b> Procesos de potabilización de agua	48
<b>Tabla 2.11:</b> Valores de K para ciertos organismos	52
<b>Tabla 2.12:</b> Guías relacionadas con SPC (mg/l)	63
<b>Tabla 2.13:</b> Procesos de Oxidación Avanzada	72
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>Tabla 3.1:</b> Variables del experimento	77
<b>Tabla 3.2:</b> Valores volumétricos del H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	81
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>Tabla 4.1:</b> Resultados de las pruebas experimentales	91





**CAPÍTULO I**  
**ASPECTOS GENERALES**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso vital para el sustento de la vida en el planeta, para el ser humano, representa además, el desarrollo de las actividades productivas de una población, claro ejemplo son los inicios de las civilizaciones primitivas, las tribus se establecían de acuerdo a las fuentes de agua cercanas para poder desarrollar sus actividades cotidianas, al agotarse esta fuente o contaminarse simplemente se desplazaban a otro lugar, donde tengan de nuevo acceso al vital líquido. En la actualidad, tal mudanza es impracticable y se deben tomar medidas para proteger el abastecimiento de agua y eliminar satisfactoriamente los materiales de desecho (Tebbutt, 1990), esto dependerá de los métodos que se empleen en el tratamiento de agua.

Históricamente, el agua contaminada por desechos humanos, animales o químicos ha sido el principal causal de graves enfermedades como la malaria, cólera, hepatitis A y E, meningitis, estiquisomiasis, entre otras. Una de las enfermedades más comunes es la diarrea de acuerdo a la OMS es la principal enfermedad que, en todo el mundo causa el 4% de las muertes y el 5% de pérdida de salud o incapacidad, el problema se agrava en los países que se encuentran en vías de desarrollo, pues no cuentan con un adecuado tratamiento de potabilización. Los eventos infecciosos más dramáticos han sido por el consumo de aguas contaminadas por desechos fecales, claro ejemplo el cólera, por esta razón la desinfección es una etapa crucial en el proceso de tratamiento.

El microorganismo patógeno común y principal indicador de contaminación fecal es la *Escherichia coli*. En la legislación nacional e internacional se establece que el agua debe estar libre de estos patógenos entéricos, pues es uno de los principales causantes de enfermedades como *Salmonellosis*, *Shigelosis*, *Amebiasis*, enfermedades gastrointestinales, etc. Ante esta situación se han explorado los más diversos métodos de desinfección físicos y químicos con el objetivo de controlar la ocurrencia de dichos patógenos en el agua.

Se puede dividir la desinfección del agua en dos maneras: natural y artificial. La desinfección natural es debida a agentes naturales (luz solar, sedimentación, estabilización de materia orgánica y filtración del suelo arenoso, entre otros) los cuales gradualmente eliminan los microorganismos patógenos. Por otro lado, en la desinfección artificial involucra el uso de componentes químicos y físicos (Guísar, 2006).

Recientemente los investigadores apuestan por una combinación de estas dos maneras de desinfección (natural y artificial) mediante el Procesos de Oxidación Avanzada (POAs), los cuales están basados en procesos físico-químicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química del contaminante, con un mínimo de subproductos después del proceso. Por ejemplo, la fotocatalisis, por su parte permite aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie terrestre, provocando la aceleración de una reacción fotoquímica mediante la presencia de un catalizador (sensibilizador), que da lugar a la



eliminación de materia orgánica y metales pesados disueltos en las aguas de vertidos urbanos, industriales y agrícolas (Pey Clemente, 2008).

En el presente trabajo de investigación se establece la posibilidad de lograr desinfectar el agua eliminando el principal indicador de contaminación fecal, la *Escherichia coli*, mediante el Foto-Fenton, el cual consiste en Luz solar y  $\text{Fe}^{3+}$ . Planteando como principal pregunta de investigación si el Foto-Fenton es igual de eficiente que el  $\text{TiO}_2$  en el proceso de desinfección.

En este trabajo se evaluará la eficiencia del proceso Foto-Fenton utilizando un Colector Parabólico Compuesto (CPC) modificado, esperando encontrar la dosis óptima de Fe (III) y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , así como el tiempo óptimo de exposición solar para lograr la eliminación completa de la bacteria en muestras fortificadas de agua y así encontrar un complemento para la desinfección de agua.

## 1.2 ANTECEDENTES

Con la creciente presión hacia un uso más racional del recurso hídrico, el desarrollo de tecnologías apropiadas de tratamiento de aguas es cada vez más urgente (Sarria, Parra, Rincón, Torres, & Pulgarín, 2005), pues se ha demostrado que el proceso convencional de tratamiento presenta deficiencias al tratar con sustancias y microorganismos que tienen un alto grado de resistencia en dicho tratamiento. Debido a ello, en los últimos años se han propuesto procesos de oxidación fotoquímicos y electroquímicos como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias antropogénicas difícilmente biodegradables, así como para eliminar bacterias en aguas destinadas al consumo humano (Sarria, Parra, Rincón, Torres, & Pulgarín, 2005). A principios de los años 80s se desarrolló el que es considerado el primer trabajo de desinfección del agua por luz solar llamado SODIS, el cual comprobó que un volumen de agua en una botella de PET expuesta al sol de 6 a 8 horas elimina a la bacteria *Escherichia coli*, este método fue aprobado por la OMS como un procedimiento mínimo viable para la potabilización casera de agua.

Más tarde se publicó un trabajo de desinfección fotocatalítica realizado por Matsunaga y col. (1985). Este equipo fue capaz de demostrar que las partículas de  $TiO_2$  irradiadas contribuían parcialmente con la destrucción de bacterias tales como el *Lactobacillus acidophilus* y la *Escherichia coli*, y levaduras como la *Saccharomyces cerevisiae*. Comprobaron además que la acción fotodestructiva de este catalizador estaba asociada a la reducción de los niveles intracelulares de la Coenzima A por foto-oxidación (Litter, Tecnologías Avanzadas de Oxidación: Tecnologías Solares).

Diao y col. (2003) publican un trabajo en el cual describieron los efectos morfológicos en la *Escherichia coli* provocados por tres bactericidas diferentes, cloro, ozono y radicales  $HO^\bullet$  producidos por la reacción Foto-Fenton, en aguas residuales contaminadas por dicha bacteria, el trabajo consistió en realizar pruebas comparativas entre los tres agentes desinfectantes. Encontraron que los daños morfológicos superficiales y estructura de la célula ocurridos en la prueba con ozono fueron menores en comparación con los daños provocados por la cloración y el Foto-Fenton, y los daños con el Foto-Fenton fueron más severos en comparación con la cloración concluyendo así que si bien el cloro afecta a la bacteria, la reacción Foto-Fenton es más eficiente para inactivarla.

Para el 2009 se publicó un trabajo relacionado con la desinfección de *E. coli* mediante Foto-Fenton; Selvakumar y col (2009) comprobaron la alta eficiencia del Foto-Fenton en varias muestras de agua procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales que contenían Solidos Suspendidos (SS) y Carbono Orgánico Disuelto (COD) en concentraciones de 28 y 290 mg/L respectivamente, la desinfección se llevó a cabo a un pH entre 5.9 y 6.0 a 25°C, los resultados fueron totalmente satisfactorios pues se eliminó por completo a la *E. coli* en un tiempo menor a una hora.

Spuhler y col. (2010) publicaron un trabajo en el cual investigaron el efecto del Fe (II), Fe (III),  $H_2O_2$  y el sistema Foto-Fenton a un pH neutro y a baja temperatura en tres tipos de agua contaminada con la bacteria *E. coli*, la primera muestra fue solo en agua MiliQ, la

segunda en agua que contiene iones minerales y la tercera en agua MiliQ enriquecida con resorcinol, el cual simula la materia orgánica. Al analizar los resultados obtenidos los autores concluyeron que los iones minerales en las aguas presentan interferencia para un resultado sobresaliente en esta nueva forma de desinfección, contrario a los otros dos casos donde la desinfección fue al 100% y que el éxito del tratamiento dependerá de las combinaciones de los elementos (Fe (II), Fe (III), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y luz ultra violeta).

En México fue en el 2002 durante XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental celebrado en Cancún, donde García Rojas y col. presentan una comparación entre cuatro desinfectantes hipoclorito de sodio, de cobre, de plata coloidal y luz ultravioleta, para la eliminación de dos patógenos *Escherichia coli* y *Vibrio cholerae*, para la determinación del número de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) emplearon la técnica de filtración por membrana que se encuentra en el apéndice B de la NOM-181-SSA1-1998. En los resultados observaron que el tratamiento con hipoclorito de sodio el *Vibrio cholerae* presentó un 85% de células sobrevivientes y la *Escherichia coli* un 91%; para el caso del cobre la sobrevivencia del *Vibrio cholerae* fue de 34% y para la *E. coli* un 82% después de una hora de contacto; los resultados en el uso de plata coloidal fueron más efectivos para la eliminación de *E. coli* ya que ésta fue eliminada en los primeros 45 minutos de contacto mientras que en la *V. cholerae* se observó un 42% de UFC sobrevivientes, por último los resultados con luz ultravioleta fueron los más eficientes pues se logró la eliminación completa de la *E. coli* y se eliminó el 67% de *V. cholerae* de las muestras contaminadas.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de la desinfección de *Escherichia coli* en muestras de concentración conocida, utilizando el proceso Foto-Fenton en un Colector Parabólico Solar (CPC) modificado.

### 1.4 OBJETIVOS PARTICULARES

- Obtener una muestra con una concentración conocida de *Escherichia coli* mediante la preparación de una muestra fortificada de agua.
- Determinar el peso óptimo de alambre recocido como fuente Fe (III) y la dosis ideal de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la muestra fortificada empleando un Colector Parabólico Solar.
- Analizar en el laboratorio empleando el método de filtración por membrana, la muestra fortificada de agua después del proceso, para la comparación de resultados

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Los procesos de desinfección de agua potable municipal se basan, esencialmente en el uso de cloro, debida a su alta efectividad para inactivar microorganismos y bacterias dañinas para la salud, disminuyendo así, la ocurrencia de enfermedades tales como la salmonelosis, sin embargo, se sabe que el uso de desinfectantes clorados puede resultar en la generación de productos secundarios de toxicidad muy variada, se ha comprobado que el uso del cloro y sus derivados dan lugar a subproductos de la desinfección (SPDs) altamente cancerígenos para el ser humano, como son los Trihalometanos (THM).

En la actualidad, se han buscado diferentes alternativas para disminuir el uso del cloro en el proceso de potabilización, una de ellas son los POAs, que presentan una ventaja en el proceso de tratamiento, al poder remover materiales no biodegradables y al no generar subproductos dañinos en comparación con los procesos convencionales de desinfección y que al combinarlos con la descontaminación de aguas mediante fotocatalisis solar es, una de las más exitosas aplicaciones. Esto es debido, a que su versatilidad permite que sea empleada con mezclas complejas de contaminantes y de organismos vivos.

La *Escherichia coli* es un patógeno entérico que vive en el tracto intestinal de los animales de sangre caliente, su presencia en el agua, es sin duda un indicador de contaminación fecal y al ser, uno de los microorganismos más resistentes a la desinfección, su eliminación prácticamente asegura la descontaminación fecal del efluente que se esté tratando, de acuerdo a los estudios realizados la aplicación de los POAs en el proceso de desinfección ha sido un éxito, motivo por el cual la desinfección mediante Foto-Fenton se presenta como una alternativa prometedora para complementar el tren de tratamiento durante la eliminación de la *Escherichia coli*, la principal ventaja que presenta este proceso frente a otros métodos de desinfección, se debe a que esta bacteria tiene afinidad al hierro, lo que aumenta la eficiencia de la reacción Foto-Fenton, además que el hierro se encuentra de forma natural en el agua y el peróxido de hidrógeno es un oxidante económico y ecológico, sin olvidar la fuente energética natural, reduciendo la formación de subproductos derivados del cloro.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO REFERENCIAL**

## **2.1 FUENTES DE AGUA**

La calidad del agua depende de la geografía, clima y actividades antropogénicas, por lo que la correcta selección de la fuente de agua para abastecimiento público es fundamental en un proceso de tratamiento de potabilización, el cual puede abarcar desde el abastecimiento directo hasta el empleo de complejos y costosos sistemas de depuración.

De acuerdo con Jiménez Cisneros (2001) existen dos tipos de fuentes de abastecimiento de agua, las convencionales y las no convencionales.

### **2.1.1 Fuentes convencionales**

Son aquellas que se han empleado tradicionalmente para el uso y consumo humano, debido a su fácil accesibilidad y bajo costo de extracción, dentro de este tipo de fuente encontramos las aguas subterráneas y superficiales.

#### *Aguas Subterráneas*

Son aquellas que se han filtrado desde la superficie de la tierra hacia abajo por los poros del suelo. Las formaciones del suelo y roca que se han saturado del líquido se conocen como, depósitos de agua subterránea o acuíferos (Henry & Heinke, 1999).

Jiménez Cisneros (2001) expone que los depósitos de aguas subterráneas conforman grandes extensiones, generalmente su alimentación es por parte de aguas pluviales, corrientes superficiales y lagos que se infiltran en el suelo. Dentro de un acuífero, el agua escurre debido a la gravedad desde las zonas de recarga hacia las de descarga, las cuales pueden ser ríos, lagos o manantiales.

Las aguas subterráneas presentan grandes ventajas respecto a las superficiales, debido a que no son tan susceptibles a la contaminación, por lo que presentan, en su mayoría, una buena calidad de agua, debido a que la carga bacteriológica es mucho menor y carece de turbiedad, sin embargo, generalmente contiene metales (hierro y magnesio) debido a los estratos terrestres.

#### *Aguas Superficiales*

El abastecimiento de agua superficial se puede efectuar a partir de arroyos, ríos, lagos, manantiales y presas. La localización y elevación de la fuente de agua puede ofrecer la ventaja de aprovechar la fuerza de gravedad y, así, facilitar la distribución (Jiménez Cisneros, 2001).

La utilización de las aguas superficiales como fuente de abastecimiento de agua, tiene la ventaja de soportar un alto grado de explotación, pues su recarga es más rápida con respecto a las aguas subterráneas, sin embargo, su alta susceptibilidad a la contaminación encarece el proceso de potabilización, así como, el alto contenido de material orgánico favorecerá a la formación de subproductos derivados de la cloración.

#### *Agua de Lluvia*

El uso directo de agua de lluvia es una fuente limitada de agua, aunque importante en unas pocas áreas que están lejos de las fuentes de agua dulce, pero que reciben precipitación pluvial con regularidad (Henry & Heinke, 1999).

La recolección y el almacenaje del escurrimiento directo de los techos puede ser una fuente segura de agua, con una lluvia irregular, el tamaño de los tanques de almacenaje debe ser grande por lo que los costos son altos; además, a no ser que los tanques estén protegidos contra la contaminación y la entrada de mosquitos, pueden surgir problemas de salud (Tebbutt, 1990).

#### **2.1.2 Fuentes no convencionales**

Este tipo de fuentes son utilizadas cuando existe escases de agua, derivada de la sobre explotación de las aguas superficiales y subterráneas; la calidad de estas fuentes es poco aceptable, por lo que son tomadas como última opción para abastecer a una población, estas fuentes pueden ser agua de mar, agua residual tratada e incluso icebergs.

#### *Agua de Mar*

Esta contiene grandes cantidades de sal, cuya eliminación resulta altamente costosa. Una técnica, para la eliminación de sal, es la destilación, la cual consiste en la evaporación y condensación del agua; otra técnica es la congelación donde se reduce la temperatura del agua hasta su punto de fusión, separando la salmuera de los cristales de hielo; la electrodiálisis es otro método, que consiste en un movimiento forzado de iones cargados a través de membranas permeables a los cationes o aniones; sin embargo, uno de los métodos más conocidos es la ósmosis inversa, donde se emplean membranas permeables y para este caso la fuerza impulsora es la presión que suministran las bombas.

En general, todas las técnicas de desalinización son altamente costosas pues los requerimientos de energía son altos.

#### *Agua Residual Reciclada*

De acuerdo a la definición de Henry & Heinke (1999), dicen que las aguas residuales recicladas son aquellas que han recibido el tratamiento suficiente para volver a ser



utilizadas directamente en la industria y en la agricultura, y para ciertas aplicaciones municipales limitadas. Estas operaciones de reciclado o de circuito cerrado pueden ofrecer la única alternativa en áreas donde es imposible obtener suficiente agua dulce. La reutilización del agua se clasifica, según su uso, en: municipal, industrial, agrícola, de recreo y para recarga de acuíferos (Jiménez Cisneros, 2001).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

El agua químicamente pura, es la combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, o sea, 11.19 partes en peso de hidrógeno y 88.81 de oxígeno. Su fórmula química es  $H_2O$ . En frío, se combina con algunos metales muy electropositivos (sodio, potasio, calcio, etc.) y en caliente con algunos otros (hierro, cobre, etc.), descomponiéndose.

La aceptación del agua para un uso definido depende de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y a veces, de si éstas pueden modificarse para adaptarla a tal fin. La composición del agua es el resultado final de muchos procesos físicos y/o químicos y/o biológicos posibles (Kiely, 1999).

### 2.2.1 Propiedades físicas del agua

El agua bruta (no tratada) normalmente tendrá impurezas cuantificadas en color, turbidez, olor y sabor. Se les llama parámetros organolépticos, es decir captados por los órganos humanos de la vista, nariz y garganta (Kiely, 1999).

*Color.* El color en el agua es producido por los minerales disueltos, colorantes o ácidos húmicos de las plantas. Los residuos coloreados, incluyendo las plantas de colorante, o pulpa y las de papel, también causan color, como la presencia de hierro, magnesio y plancton. El color se mide en unidades de mg/l de platino, y en los ríos oscila entre 5 y 200 mg/l (Kiely, 1999). La importancia del color en agua de consumo, es fundamentalmente de carácter organoléptico, cuando solo se dispone de agua coloreada, ineludiblemente se le asocia a agua “no adecuada” para la salud (Marín, 2006).

De igual forma, en la formación de color en el agua intervienen factores como el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la disponibilidad de los compuestos coloreados. Se conocen 2 tipos de color en las aguas, el aparente, es aquel que presentan las aguas crudas o naturales, y el verdadero, el cual es el que queda después del proceso de filtración (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

*Turbidez.* La turbidez en el agua es una medida de la nubosidad. Es causada por la presencia de la materia en suspensión, la cual dispersa y absorbe luz. En los lagos, la

turbidez es debida a las suspensiones coloidales o finas. Son notables los lagos limpios en los que la luz puede penetrar a gran profundidad. En los ríos que fluyen rápidamente, las partículas en suspensión son más grandes y las condiciones turbidas acontecen durante períodos de riada. La turbidez puede relacionarse con los sólidos en suspensión, pero sólo para las aguas que proceden del mismo origen (Kiely, 1999). Se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), el instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (LEENTECH, 2009).

A ciencia cierta no se conocen los efectos directos de la turbiedad en la salud humana, pero ésta provoca el rechazo de los consumidores, ya que no es agradable a la vista. Por otro lado, Ada Barrenechea (2005), señala que existen estudios que han demostrado que la turbiedad reduce la eficiencia del proceso químico para la eliminación de microorganismos, ya que las partículas coloidales protegen físicamente al microorganismo del desinfectante.

En la legislación internacional, se establece que el agua debe presentar una turbidez menor a 1 NTU y en ningún caso mayor a 5 NTU. En México, este parámetro se encuentra establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

*Olor.* El agua limpia (destilada) es inodora. Muchas sustancias químicas orgánicas y algunas inorgánicas son olorosas, incluyendo las algas y otros organismos. El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), a veces presente en el agua subterránea y en las aguas residuales, es mal oliente. El umbral del olor se determina al diluir una muestra de agua sin olor hasta que se detecta un olor perceptible. Este resultado se expresa como una relación de dilución. El umbral de olor más pequeño es el 1 (Kiely, 1999).

*Sabor.* El sabor, al igual que el olor, puede ser debido a la disminución de los microorganismos o algas. De igual forma lo proporcionan las altas concentraciones de sales tales como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , y  $Cl^-$ . (Kiely, 1999).

La incidencia y problemática asociada a los olores y sabores del agua de consumo humano, viene marcado por dos aspectos: pH y Temperatura. Esto es debido a que, generalmente, las sustancias con incidencia organoléptica suelen estar afectadas por un equilibrio ácido-base en que sólo una de las formas es la que produce el problema.

**Tabla 2.1:** Olores y Sabores típicos de las aguas de acuerdo a su origen  
 (Marín , G. R.(2006))

<b>OLORES</b>	<b>SABORES</b>
Aromático (especies limón, etc.)	Amargo
Balsámico (flores diversas)	Metálico
Clorado	Salado
Hidrocarburos	Medicinal
Medicinal	Terroso
Sulfuro	Mohoso
Terroso	Otros
Fecal	
Mohoso (cieno, fango, otros)	

**Tabla 2.2:** Límites permisibles de la calidad del agua para consumo humano: características físicas y organolépticas, máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE</b>
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino- cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad Nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

*Temperatura.* La temperatura representa un parámetro significativo, debido a que, en función de ésta, las propiedades del agua cambian, como la viscosidad, la densidad, el calor específico, la tensión superficial, la solubilidad de las sales y gases, y en general, todas sus propiedades tanto químicas como microbiológicas.

De acuerdo con la dinámica en el comportamiento de la temperatura del agua de un lago a lo largo de un año, estos pueden dividirse en: Amícticos, Monomícticos fríos, Monomícticos calientes, Dimícticos, Oligomícticos y Polimícticos.

Para las aguas superficiales, su temperatura depende del terreno que drenan, la naturaleza de las rocas y la profundidad (Marín, 2006).

*Sólidos.* El contenido de los sólidos del agua es otro de los parámetros significativos. La cantidad, el tamaño y el tipo de sólidos dependen del tipo de agua. Por ejemplo, un agua residual fecal no tratada puede tener partículas orgánicas, incluyendo

trozos de comida, mientras que un agua purificada de bebida puede tener partículas en un rango de  $10^{-6}$ mm. Los sólidos presentes en el agua se clasifican principalmente en; Sólidos totales (ST), Sólidos en suspensión (SS), Sólidos totales disueltos (STD), Sólidos totales volátiles (STV), Sólidos volátiles en suspensión (SVS) (Ecoportal Ambiente y Sociedad, 2033).

### 2.2.2 Propiedades Químicas del Agua

Las características químicas, tienden a ser más específicas en su naturaleza, que algunos de los parámetros físicos y por eso son más útiles para evaluar las propiedades de una muestra (Tebbutt, 1990).

*pH.* Es un parámetro básico que indica el grado de acidez o basicidad del agua, este parámetro es de gran importancia en el tratamiento de agua, especialmente en la coagulación, desinfección y estabilización (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

La desinfección con cloro es más efectiva a un nivel bajo de pH. Esto se debe a la mayor efectividad del ácido hipocloroso comparado con el ion hipoclorito. La estabilidad del agua, depende de este parámetro ya que una planta de tratamiento debe producir agua que no sea corrosiva ni incrustante, lo que significa que el pH del agua tratada debe ser ligeramente mayor que el pH de saturación, o sea, el índice de saturación debe ser ligeramente positivo (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

*Alcalinidad.* Es la capacidad del agua para aceptar los iones  $H^+$  (Kiely, 1999), es debida a la presencia de bicarbonato  $HCO_3^-$ , carbonato  $CO_3^{=}$ , o hidróxido  $OH^-$ . La alcalinidad en las aguas naturales es debida a la presencia de  $HCO_3^-$  producido por la acción del agua subterránea en piedra caliza o yeso. La alcalinidad es útil en el agua natural y en las aguas residuales porque proporciona un amortiguamiento para resistir los cambios de pH. (Tebbutt, 1990).

*Acidez.* La acidez puede definirse como su capacidad para neutralizar bases, como su capacidad para reaccionar con iones hidróxido, como su capacidad para ceder protones o como la medida de su contenido total de sustancias ácidas (Romero Rojas, 1999).

En las aguas naturales la acidez puede ser producida por el  $CO_2$ , por la presencia de iones  $H^+$ , por la presencia de acidez mineral proveniente de ácidos fuertes como el sulfúrico, nítrico, clorhídrico, etc., y por la hidrolización de sales de ácido fuerte y base débil (Romero Rojas, 1999).

La mayoría de las aguas naturales y el agua residual doméstica, son amortiguadas por un sistema de  $CO_2 - HCO_3^-$ . El ácido carbónico  $H_2CO_3$  no se neutraliza totalmente hasta un pH de 8.2 y no disminuye el pH por debajo de 4.5. Así, la acidez del  $CO_2$  ocurre dentro de

un pH de 8.2 a 4.5, la acidez mineral se presenta por debajo de un pH de 4.5. La acidez se expresa en términos de  $\text{CaCO}_3$  (Tebbutt, 1990).

*Dureza.* Se considera un agua dura cuando ésta necesita grandes cantidades de jabón para producir espuma y además produce incrustaciones en tuberías y unidades que transportan o están en contacto con agua caliente. Se debe principalmente, a la presencia de los iones metálicos  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ . Los metales generalmente se encuentran asociados con  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ . No representa peligro para la salud humana, sin embargo, presentan desventajas económicas por consumo excesivo de jabón y costos más altos de combustible (Tebbutt, 1990).

De acuerdo a Romero Rojas (1999), la dureza de las aguas puede clasificarse como:

- Blanda: 0 – 75 mg/L
- Moderadamente dura: 75 – 150 mg/L
- Dura: 150 – 300 mg/L
- Muy dura: >300 mg/L

El valor de la dureza determina, por tanto, su conveniencia para uso doméstico e industrial y la necesidad de un proceso de ablandamiento. El tipo de proceso a seguir depende de una adecuada determinación de la magnitud y clase de dureza (Romero Rojas, 1999).

- a) Dureza carbonatada: en aguas naturales los bicarbonatos son la principal forma de alcalinidad; por lo tanto, la parte de la dureza total químicamente equivalente a los bicarbonatos presentes en el agua es considerada como la dureza carbonatada, también se le conoce como dureza temporal porque desaparece cuando el agua hierve, es decir que puede precipitarse mediante ebullición prolongada (Romero Rojas, 1999).
- b) Dureza no carbonatada: es la que no se encuentra relacionada con los bicarbonatos; ésta incluye principalmente sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y magnesio.
- c) Dureza no carbonatada negativa: algunas aguas contienen mayor alcalinidad que dureza total. Esto significa que existen más iones bicarbonatos de los necesarios para satisfacer los iones metálicos divalentes causantes de la dureza (Romero Rojas, 1999).

*Nitrógeno.* Es de gran interés debido a su importancia en los procesos vitales de todas las plantas y animales. Las formas del nitrógeno se describen a continuación (Romero Rojas, 1999):

- a) Nitrógeno amoniacal: es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y deben su origen, al nitrógeno atmosférico (por fijación química), las proteínas animales o vegetales (por putrefacción mediante acción bacteriana) y a la reducción de nitritos. Se le considera un constituyente normal de las aguas superficiales y está íntimamente relacionado con descargas recientes de desagües. Cuando su concentración es mayor de 0.1 mg/L (como N), podría constituirse en un indicador de contaminación por aguas residuales domésticas o industriales (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).
- b) Nitrógeno de nitritos: raras veces aparece en concentraciones mayores a 1 mg/L, aún en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. En aguas superficiales y subterráneas su concentración es generalmente menor a 0.1 mg/L. Su presencia normalmente se debe a procesos biológicos activos en el agua (Romero Rojas, 1999).
- c) Nitrógeno orgánico: todo nitrógeno presente en compuestos orgánicos puede considerarse como nitrógeno orgánico, la presencia de éste en el agua se debe a compuestos como aminoácidos, aminas, polipéptidos, proteínas y otros compuestos orgánicos.

La OMS establece como valor guía para las aguas de bebida 1.5 mg/L; en México la NOM-127-SSA1-1994 establece 0.50 mg/L para nitrógeno amoniacal, 10 mg/L para nitratos y 0.05 mg/L para nitritos.

*Azufre*. Tanto en la purificación de las aguas como en el tratamiento de aguas residuales se presentan diferentes formas químicas del azufre que son de interés como lo describe Romero Rojas (1999) a continuación:

- a) Sulfatos: Son componentes de las aguas naturales y se encuentra en bajas concentraciones que no llegan a afectar a la salud humana; sin embargo en concentraciones superiores a 250 mg/L puede tener un efecto laxante sobre todo en niños, de igual forma proporciona un mal sabor al agua de bebida.

En aguas residuales la cantidad de sulfatos es un factor muy importante para la determinación de los problemas que pueden surgir por olor y corrosión de alcantarillas.

- b) Sulfuros: Se entiende por sulfuros los compuestos de azufre con un número de oxidación de -2. Éstos son muy comunes en las aguas residuales domésticas e industriales donde se encuentran en forma suspendida o disuelta. En general, los sulfuros insolubles no superan el nivel de 1 mg/L; el resto está en forma disuelta.

También se presentan en aguas subterráneas y en aguas superficiales, como resultado de la descomposición biológica anaerobia de materia orgánica.

- c) Sulfitos: Son los compuestos del azufre con número de oxidación de +4. Se encuentran en algunos residuos industriales y aguas contaminadas, pero generalmente son de interés en aguas de calderas donde se trata el agua con sulfito de sodio para reducir el Oxígeno Disuelto (OD) del agua en un mínimo y prevenir la corrosión.

*Cloruros*. Estos compuestos normalmente se encuentran en cantidades muy pequeñas en los cuerpos de agua continentales y subterráneos, generalmente están en altas concentraciones en los mares o en los cuerpos de agua que entran en contacto con las corrientes marinas.

Los excrementos humanos, principalmente la orina, contienen cloruros en una cantidad casi igual a la de los cloruros consumidos en los alimentos y el agua. Esta cantidad en promedio son unos 6 gramos de cloruros por persona por día, e incrementa el contenido de  $Cl^-$  en las aguas residuales en unos 20 mg/L por encima del contenido propio del agua (Romero Rojas, 1999).

*Fluoruros*. Elemento que ayuda a la prevención de caries en los dientes, una vez ingerido el organismo los absorbe y los distribuye por la sangre a todos los órganos. Dada la afinidad especial del flúor con el hueso y el diente (Romero Rojas, 1999), es allí donde radica su importancia para el consumo humano; sin embargo en altas concentraciones puede generar problemas en la salud bucal y en la estructura ósea.

Para el tratamiento de aguas residuales los fluoruros son contaminantes a eliminar, caso contrario ocurre en la potabilización, a los suministros de agua se le adicionan dosis óptimas dada la importancia que tienen en el ser humano.

*Hierro*. Es un componente natural del organismo humano. Por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales (Barrenechea Martel, Capítulo 1. Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

Las sales solubles de hierro son, por lo general, ferrosas (Fe II) y la especie más frecuente es el bicarbonato ferroso  $Fe(HCO_3)_2$ . En contacto con el oxígeno disuelto en el agua, las sales ferrosas se convierten en sales férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es de forma inmediata con un pH superior a 7.5 (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

La remoción del hierro en las aguas crudas superficiales es relativamente fácil con los procesos comunes de remoción de la turbiedad, mediante las cuales su concentración puede

bajar de 10 mg/L a 0.3 mg/L, que es la concentración recomendada para el agua de consumo (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).

*Manganeso.* En el organismo animal funciona como un activador enzimático, aun que, en altas concentraciones causa daños en el sistema nervioso central, generalmente no se encuentra de forma natural en las aguas debida a su baja solubilidad, sin embargo, su presencia en cuerpos de agua es asociada al hierro; las concentraciones de manganeso superiores a 0.15 mg/L provoca un sabor desagradable para el agua de consumo, la remoción de éste compuesto es más complicada que la del hierro, pues se hace reaccionar para la formación de sales insolubles usando oxidantes o un alto pH.

*Arsénico.* A pesar de ser un compuesto sumamente tóxico y cancerígeno para el ser humano, lo podemos encontrar de forma natural en el agua con concentraciones inferiores a 10 µg/L, a excepción de las zonas minaras que va desde 0.2 g/L hasta 1 g/L. La eliminación de arsénico en el agua para uso y consumo humano se basa en su oxidación a su forma pentavalente con sulfato férrico con un pH de 6 a 8, con alumbre a pH 6 a 7 o con ablandamiento con un pH de 11.

*Cobre.* Lo podemos encontrar de forma natural en el agua a concentraciones muy bajas que no afectan la salud del ser humano, además favorece la formación de la hemoglobina la deficiencia de cobre en humanos se asocia con la anemia; sin embargo, en concentraciones superiores a los límites establecidos causa graves problemas de salud en los humanos, en el sistema de abasto produce corrosión de las cañerías y, en los cuerpos de agua disminuye el OD provocando la muerte de los organismos que ahí habitan.

*Fósforo.* Es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales; actualmente es considerado como uno de los nutrientes que controla el crecimiento de algas. Las algas requieren para su crecimiento fósforo y, consecuentemente, un exceso de fósforo produce un desarrollo exorbitado de algas, el cual es causa de condiciones inadecuadas para ciertos usos benéficos del agua (Romero Rojas, 1999).

*Materia orgánica (MO).* Las aguas naturales, además de sustancias minerales, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos o del metabolismo de los organismos que viven en ellos. Además, los cuerpos de agua superficiales pueden recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico o industrial, las cuales provocan contaminación en diferentes niveles (Barrenechea Martel, Capítulo 1: Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, 2005).



La determinación de la MO en el agua es complicado debido a que son numerosas sustancias las que podemos encontrar, para esto se han establecido dos métodos analíticos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

*Oxígeno Disuelto (OD)*: Tebbutt (1990) plantea que las aguas superficiales limpias normalmente están saturadas con OD, pero la demanda de oxígeno de los desechos orgánicos puede consumirlo rápidamente. Las aguas saturadas de oxígeno tienen un sabor agradable y las aguas con deficiencia de OD son insípidas; por esta razón, si es necesario, las aguas para beber se airean para que tengan un OD máximo.

Se ha demostrado la existencia de una estrecha relación entre la distribución de oxígeno y la productividad de la materia orgánica, viva o muerta. Por otro lado, la cantidad de OD en un cuerpo de agua está relacionada con su capacidad de autodepuración (Barrenechea Martel, Capítulo 1. Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua, 2004).

**Tabla 2.3:** Límites permisibles de la calidad del agua para consumo humano. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

CARACTERÍSTICA	LÍMITE (mg/L)
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Nitrógeno Amoniacal (como N)	0.50
Nitratos	10.00
Nitritos	1.00
pH (potencial hidrógeno) en unidades de pH	6, 5-8, 5
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400.00
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Fierro	0.30
Manganeso	0.15
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Cobre	2.00

## 2.3 MICROBIOLOGÍA DEL AGUA

En el siguiente apartado se hablará sobre la biología, ecología, tipos y desarrollo de los microorganismos presentes en el agua, enfatizando la presencia de bacterias en el agua específicamente *Escherichia coli*.

Romero (1999), plantea que todo organismo debe encontrar en su medio las unidades estructurales y las fuentes de energía necesarias para formar y mantener su estructura y organización. Dichos materiales son llamados nutrientes y casi todos los organismos vivos requieren fuente de carbono, energía, nitrógeno, agua y mineral.

Los organismos autótrofos son capaces de sintetizar sus requerimientos orgánicos a partir de la materia inorgánica y pueden crecer independientemente de las sustancias orgánicas externas, empleado dos métodos para alcanzar este fin, la fotosíntesis y la quimiosíntesis.

Los organismos heterótrofos requieren una fuente externa de materia orgánica; los tres principales son:

1. Los saprófobos: obtienen la materia orgánica soluble directamente del ambiente circundante o por la digestión extracelular de compuestos insolubles.
2. Los fagótrofos: algunas veces llamados formas holozoicas, utilizan partículas orgánicas sólidas.
3. Los parásitos: obtienen la materia orgánica a partir de los tejidos de otros organismos vivos, por lo que se denominan parásitos.

En términos de requerimientos de temperatura, hay tres tipos principales de organismos: los microfilicos, que viven a una temperatura cercana a 0 °C; los mesofilicos, viven a temperaturas de 15 y 40 °C y los termofilicos, que viven a temperaturas de 50 a 70 °C.

### 2.3.1 Tipos de Microorganismos

En la bibliografía básica encontramos que la microbiología estudia células pertenecientes a dos grandes grupos, las eucariotas y las procariotas. Las primeras son aquellos organismos unicelulares o multicelulares que poseen un núcleo verdadero, además de poseer mitocondrias y cloroplastos presentes sólo en células capaces de realizar la fotosíntesis (protozoarios, hongos y algas). Las células procariotas son aquellas cuya estructura es sencilla y no poseen un núcleo verdadero, es decir son bacterias (ver tabla 2.4).

**Tabla 2.4:** Diferencias entre células eucariotas y procariotas (Apella & Araujo, 2005).

		<b>Procariotas</b>	<b>Eucariotas</b>
<b>Núcleo</b>		No verdadero	Verdadero
	Cromosomas	Único y circular	Varios y lineales
	Membrana	No	Si
<b>División celular</b>		Fisión binaria <sup>1</sup>	Mitosis <sup>2</sup> /Meiosis <sup>3</sup>
<b>Organización del citoplasma</b>	Mitocondrias	No	Si
	Nucléolos	No	Si
	Retículo Endoplasmático	No	Si
	Aparato de Golgi	No	Si
	Ribosomas	Tipo 70S	Tipo 80S
<b>Pared celular</b>		Si (peptidoglicano y lipopolisacáridos)	Si (celulosa o quitina en hongos)
<b>Órganos de movilidad</b>		Flagelos	Cilios y flagelos
<sup>1</sup> Replicación del ADN y división de la célula en dos células idénticas; <sup>2</sup> división del núcleo; duplicación y distribución del ADN en las dos células hijas; <sup>3</sup> división celular que origina células con la mitad del número de cromosomas (haploides)			

### 2.3.1.1 Bacterias

Son organismos unicelulares que se encuentran en el aire, suelo, agua natural y aguas residuales, su forma de reproducción es mediante fisión binaria, o sea, por bipartición.

Henry & Heinke (1999), describen un diagrama esquemático de una célula bacteriana representativa (figura 2.5); en donde señalan que todas las bacterias tienen una **pared celular** rígida, la cual conserva la forma de la célula y protege su contenido de la presión osmótica. Si se quitara la pared celular, la célula se aplastaría o reventaría debido a la presión de su contenido. La pared ordinariamente tiene 0.02 a 0.03  $\mu\text{m}$  de espesor y constituye del 10 al 40% del peso seco del organismo. Ciertas bacterias están cubiertas por una capa de sustancia viscosa llamada **cápsula** o capa mucosa. Para algunas bacterias patógenas la presencia de cápsulas aumenta su capacidad infecciosa, en otros casos la carencia de éstas ocasiona la pérdida de la capacidad para causar enfermedades. La rigidez de la pared celular determina su morfología, encontramos que presentan tres formas principales: esférica (cocos), cilíndrica o con aspecto de bastón (bacilos) y espiral (espirilos).

Romero Cabello (2001) propone una clasificación de las cápsulas desde un punto estructural: *La macrocápsula*, es de gran espesor y en algunos casos de mayor tamaño que el cuerpo de la bacteria. *La microcápsula*, es una delgada película poco visible que cubre la superficie de la pared y la capa mucilaginosa, que es un estrato gelatinoso, semisólido

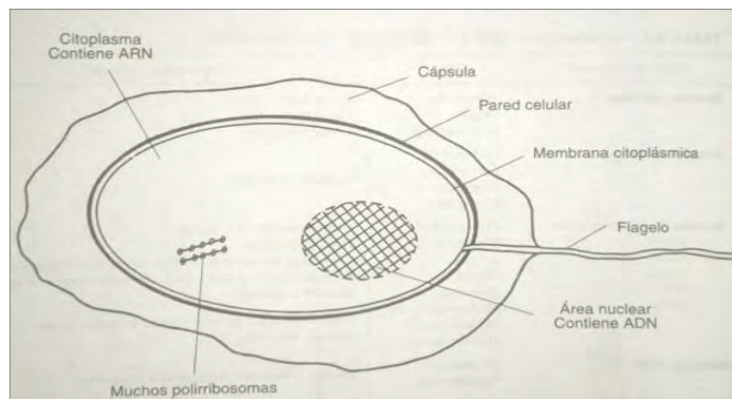
adherido en forma floja a la pared. *El glicocalix*, es la parte más externa y participativa en la adherencia.

Los **flagelos** son filamentos largos con aspecto estructural de látigo que le proporcionan la movilidad a las bacterias, principalmente a los bacilos, que pueden tener de uno a más flagelos unidos a un extremo, a ambos o alrededor de la célula, a veces llegan a medir hasta 20 micras de longitud y aproximadamente entre 5 y 10 nanómetros de espesor; están conformados por una proteína llamada *flagelina* y químicamente son diferentes a los flagelos de las eucariotas.

Debajo de la pared celular encontramos la **membrana citoplasmática** cuya función es separar el protoplasma del ambiente externo y suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento y funcionalidad de la célula, si la membrana llegara a dañarse por algún agente químico o físico ocasionará la muerte inmediata de la célula bacteriana.

Estructuralmente la membrana citoplasmática es una película delgada formada por dos capas de lipoproteínas que en conjunto miden aproximadamente 5 nanómetros de espesor, se encuentra íntimamente adosada a la superficie interna de la pared, es una barrera osmótica de la célula, es el sitio de sistemas enzimáticos particularmente de los citocromos y los citocromo-oxidasas, catalasa, peroxidasa, deshidrogenasas, síntesis de proteínas y de excreción de productos de desecho (Romero Cabello, 2001).

El **protoplasma** es el contenido interno de la célula y esta dividida en tres partes: el **citoplasma** (con abundancia del ARN, la porción fluida del citoplasma contiene nutrientes disueltos), el **área nuclear** (contiene al ADN o cromatina, que se encuentra difundido en todas las células procariotas) y los **polirribosomas** es el conjunto de proteínas y ARN, éstos producen las enzimas, que son catalizadores orgánicos complejos.



**Figura 2.1:** Diagrama esquemático de una célula bacteriana típica

## **Crecimiento y muerte de las bacterias**

Por crecimiento bacteriano entendemos dos conceptos, uno es el aumento de volumen de la célula desde la división celular hasta la siguiente, y el otro es el aumento de la población, o sea, el número de individuos. Definiendo ambos conceptos encontramos que, el primero se refiere a la densidad bacteriana, que es la masa total del conjunto de la población dejando de lado el número de bacterias viables, y el segundo, es la concentración poblacional, refiriéndose al número de bacterias contenidas en un volumen determinado del medio de cultivo.

Para medir la concentración bacteriana existen diversos métodos uno de ellos es por cuenta en la cámara de Petroff-Hausser y otro de los métodos más conocidos es por conteo de colonias viables. Por otra parte, la densidad bacteriana la podemos medir mediante el peso seco de la masa total del crecimiento bacteriano, por volumen relativo o por turbidez.

### *Requerimientos nutritivos*

Los nutrientes requeridos en grandes cantidades son denominados *macronutrientes* mientras que los *micronutrientes* son necesarios en cantidades trazas (Apella & Araujo, 2005). Entre los primeros encontramos:

Carbono: existen bacterias autótrofas o litótrofas que requieren de agua, sales inorgánicas y CO<sub>2</sub> para su metabolismo, son bacterias que tienen un equipo metabólico muy completo para la síntesis de compuestos orgánicos a partir de sales inorgánicas. Estas bacterias no necesitan parasitar organismos superiores, generalmente se encuentran en el suelo, en el agua, son de vida libre. Las bacterias heterótrofas u organótrofas, requieren de compuestos orgánicos como fuente de carbono para su crecimiento, esto significa que el equipo metabólico es diferente al de las bacterias autótrofas, generalmente estas bacterias se encuentran sobre organismos superiores de donde obtienen los compuestos orgánicos, o bien, se encuentran en lugares donde existen materiales orgánicos en descomposición (Romero Cabello, 2001).

Nitrógeno y Azufre: la gran mayoría de los organismos fotosintéticos, así como muchas bacterias no fotosintéticas y hongos, asimilan estos dos compuestos en estado inorgánico oxidado, como nitratos y sulfatos. Los requerimientos de nitrógeno y azufre pueden satisfacerse con frecuencia, con nutrientes orgánicos que contengan estos dos elementos en combinación orgánica reducida (Stainer, Ingraham, & Painter, 1992)

Iones inorgánicos: los elementos necesarios para el metabolismo de las bacterias son: azufre, fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro, manganeso, zinc, cobre, cobalto, selenio y molibdeno (Romero Cabello, 2001).

Oxígeno: las exigencias de este elemento en una bacteria en particular, reflejan el tipo de metabolismo productor de energía y de acuerdo a esta relación se clasificarán en: *anaerobias obligadas*, *anaerobias facultativas*, *aerobias obligadas* y *microaerófilas* (Varela & Grotiuz, 2008). Además este elemento marca la diferencia entre el crecimiento o ausencia de cierto tipos de bacterias.

Algunos organismos, además de los minerales, necesitan muy pequeñas cantidades de nutrientes de naturaleza orgánica llamados factores de crecimiento, los cuales son vitaminas, aminoácidos, purinas y pirimidinas. Los organismos que tienen tales requerimientos se les denomina *auxótrofos* para diferenciarse de los *potrótofos* que son independientes de tales factores (Apella & Araujo, 2005).

#### *Requerimientos físicos*

De acuerdo a Romero Cabello (2001) los requerimientos físicos de las bacterias son los siguientes:

La temperatura: es un factor importante en el crecimiento de las bacterias, ya que existen grupos bacterianos que crecen mejor a diferentes temperaturas, de manera que podemos distinguir tres grupos, *criófilas o sicrófilas*, son las que crecen mejor a bajas temperaturas (15 a 30°C); las *mesófilas*, crecen a temperaturas medias (10 a 45°C) y las *termófilas*, crecen a altas temperaturas (50°C).

Potencial hidrógeno: el pH es también un factor muy importante en el metabolismo y la reproducción de las bacterias, ya que la variación de éste puede llegar a inactivar el sistema metabólico y destruir a la bacteria, de acuerdo a las necesidades de pH se distinguen tres tipos de bacterias: las *acidófilas* (pH menos de 7), las *neutrófilas* (pH 7) y las *alcalófilas o basófila* (pH mayor a 7.8). Únicamente las neutrófilas pueden parasitar en organismos superiores.

La población bacteriana crecerá en medida que los nutrientes se introduzcan a su medio, con las condiciones adecuadas y dependiendo del tipo de organismo, en pocos minutos se tendrá una alta concentración de individuos, al intervalo de tiempo de generación se le conoce como **tiempo de generación**.

Los tiempos de generación a 20°C varían desde 15 a 20 minutos para *Escherichia coli* hasta varias horas para otras especies. Aunque las bacterias crecen en una amplia variedad de condiciones, el desarrollo óptimo requiere de un ambiente específico para cada especie (Henry & Heinke, 1999).

El crecimiento poblacional bacteriano es de forma exponencial, ya que una célula se divide en dos y estas a su vez en otras dos y así sucesivamente, matemáticamente el tiempo de generación se representa con la letra “g” y está definida como el cociente entre el tiempo transcurrido (t) y el número de divisiones (x) que ocurrieron en ese tiempo, si tomamos en cuenta el número de células obtenidas en ese tiempo a partir de las células iniciales obtenemos la siguiente ecuación para calcular el tiempo de generación:

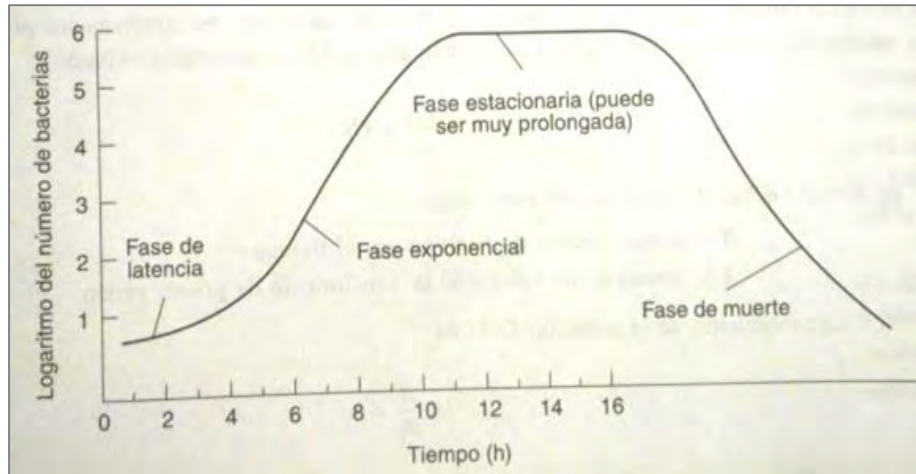
$$g = \log 2 \frac{t}{[\log \frac{x}{x_0}]} \quad \text{ecuación 2.1}$$

Otro parámetro que permite analizar el crecimiento exponencial es la **velocidad de crecimiento** que se representa con la letra *k* y se define como el número de generaciones que ocurren en un tiempo *t* (Apella & Araujo, 2005):

$$k = \frac{n}{t} = g^{-1} = \frac{[3,3 \log \frac{x}{x_0}]}{t} \quad \text{ecuación 2.2}$$

El crecimiento de la comunidad bacteriana tiene los siguientes momentos: **fase de latencia**, donde los organismos se adaptan al medio y representa la etapa inicial del crecimiento bacteriano, durante esta fase se observa una importante actividad metabólica en las células, las cuales aumentarán a su máximo tamaño y habrá una alta concentración de ARN, durante la fase de latencia no existe incremento alguno en la población, ya que una vez terminada la adaptación se da paso a la **fase de crecimiento exponencial o logarítmico**, en esta fase se da el crecimiento más rápido de todo el proceso, sin embargo, esta etapa depende directamente de los factores ambientales y nutricionales, así como del tiempo de reproducción de cada especie, para la *Escherichia coli*, en condiciones óptimas, su tiempo de reproducción es de cada 20 minutos, mientras que en condiciones adversas se da cada 30 minutos; gráficamente la fase exponencial es de forma ascendente, y durante ésta podemos calcular el tiempo de generación, la duración de esta fase depende de el alimento contenido en el cultivo, una vez que dicho alimento empieza a escasear, las células empiezan a morir y su velocidad de reproducción empieza a disminuir, cuando el número de organismos nuevos es igual al de organismos muertos se ha alcanzado la **fase estacionaria**, gráficamente se denota como una línea horizontal, en esta fase el número de organismos viables y los no viables se encuentran en equilibrio debido al agotamiento de los nutrientes,

la duración de esta etapa dependerá de la cantidad sobrante de nutrientes y del acumulamiento de productos tóxicos para el organismo, dando paso a la **fase de muerte o menguante**, aquí se ve rebasada la velocidad de crecimiento con respecto a la de mortandad, que junto con la acumulación de productos tóxicos, el viraje de pH y el agotamiento de los nutrientes dan como resultado la inhibición del crecimiento, gráficamente se da como un trazo recto descendente.



**Figura 2.2:** Curva representativa de crecimiento bacteriano (Henry & Heinke, 1999)

El conocimiento de la nutrición bacteriana permite el cultivo de los microorganismos en el laboratorio, donde el desarrollo de estos se da en **medios de cultivo**, que son ambientes artificiales diseñados por el hombre para proporcionar todas las sustancias necesarias para el crecimiento microbiano (Apella & Araujo, 2005). Los medios de cultivo se clasifican en:

1. *Sintéticos o definidos*: contienen concentraciones conocidas de sustancias químicas puras, de naturaleza orgánica y/o inorgánica, su composición dependerá del organismo a cultivar.
2. *Complejos o indefinidos*: los constituyen compuestos de alta calidad nutricional, pero de composición química desconocida ya que son el producto resultante de infusiones y extractos de sustancias naturales complejas. Según la finalidad para la cual son formulados se pueden clasificar en:



1. *Enriquecidos*: son medios complejos con aditivos adicionales para favorecer el crecimiento de determinados microorganismos.
2. *Selectivos*: por su diseño permiten el crecimiento específico de un determinado microorganismo o grupo de microorganismos e impiden mayoritariamente el desarrollo de los demás.
3. *Diferenciales*: permiten distinguir a simple vista dos o más tipos de bacterias en función de su distinto comportamiento respecto de algún nutriente del medio.
4. *Selectivos-diferenciales*: representan una combinación de los dos últimos medios. Permiten el crecimiento de una bacteria o un tipo bacteriano y al mismo tiempo producen una coloración característica del organismo.
5. *Electivos*: Favorecen el desarrollo de una especie bacteriana y las restantes crecen poco y lentamente.

Cualquier tipo de medio se puede crear sólido, semi-sólido o acuoso conocidos como *caldos*.

La mayoría de las bacterias son beneficiosas para el ecosistema acuático. De ellas depende la mayor parte de las transformaciones orgánicas y favorecen la depuración de los cuerpos de agua, sin embargo, existe otro grupo de bacterias que son patógenos y causan graves enfermedades en los animales y el ser humano (Aurazo de Zumaeta, 2004).

### **2.3.2 Bacterias Indicadoras de Contaminación**

La gran mayoría o casi todos los cuerpos de agua en el mundo están contaminados, esto se debe a los diferentes arrastres, lixiviaciones, erosiones y procesos de intemperie por los que pasa toda agua natural, como consecuencia los cuerpos receptores tendrán gran florecimiento bacteriano, así como gran cantidad de nutrientes como nitratos y fosfatos, material orgánico como hojas y ramas, y de igual forma se encontrarán contaminantes inorgánicos productos de las actividades humanas. Los contaminantes no representan problema alguno para los cuerpos receptores de agua, siempre y cuando éstos no rebasen su capacidad de carga y autopurificación. Aquellos que provocan problemas comprenden organismos causantes de enfermedades conocidos como “patógenos”, materia orgánica, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color, espuma, calor y materiales radioactivos.

*Patógenos*: su presencia en el agua de un cuerpo receptor de agua, que es empleado para uso y consumo humano, es preocupante para el sector salud debido a los graves problemas ocasionados por enfermedades microbiológicas. *Materia orgánica (MO)*: cuando mayor es la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), esto es, cuanta más materia orgánica está presente, mayor es el problema que crea la descomposición de la misma. La actividad metabólica de las bacterias que necesitan oxígeno puede reducir el contenido normal de oxígeno disuelto (OD) en una corriente o lago hasta menos de 1 mg/L, abajo del cual la mayor parte de los peces son incapaces de sobrevivir. *Sólidos*: los particulados orgánicos e

inorgánicos en las aguas residuales son sólidos sedimentables, flotantes y en suspensión capaces de reducir la penetración de la luz solar en el agua. *Nutrientes*: los nitratos y fosfatos favorecen el crecimiento de plantas y algas que pueden ocasionar la eutrofización del cuerpo de agua, además de representar un problema para la ganadería pues son tóxicas para el ganado, de igual forma obstruye los filtros y el tratamiento químico del agua se vuelve costoso. *Sustancias tóxicas y peligrosas*: concentraciones bajas de ácidos, cáusticos, cianuro, arsénico, muchos metales pesados y numerosas sustancias químicas son tóxicas para los organismos vivos, incluso para los humanos. *Otros contaminantes*: el color, la espuma y el calor son otros contaminantes que causan problemas, no son objetables solo por razones estéticas; también limitan la penetración de la luz y pueden reducir los niveles de OD, todo lo cual altera el equilibrio ecológico natural del agua (Henry & Heinke, 1999).

#### *Bacterias indicadoras de contaminación*

Determinar los todos organismos presentes en la aguas a tratar proporcionaría una herramienta poderosa para determinar la calidad del agua y el proceso a seguir, sin embargo, detectar todos los microorganismos patógenos implicados en el proceso de contaminación acuática presenta altos costos, tiempo y la necesidad de laboratorios especializados. Una solución rápida para este problema son los organismos indicadores de contaminación, estos tienen un comportamiento similar a los patógenos y son más fáciles y rápidos de detectar, una vez demostrada la presencia de estos microorganismos se concluye que los patógenos se encuentran en la misma concentración.

Para que un organismo se considere como indicador de contaminación debe reunir una serie de requisitos que a continuación se describen:

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal.
- Estar exclusivamente en las heces de los animales de sangre caliente.
- Estar presente cuando los microorganismos patógenos lo estén.
- Debe ser fácil de aislar y cuantificar.
- Estar relacionado cuali y cuantitativamente con la de otros microorganismos patógenos de aislamiento más difícil.
- No debe ser patógeno.

Los indicadores de contaminación de agua más utilizados son los **Coliformes Totales** (CT) los cuales por definición están conformados por “todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no formadoras de esporas y con forma de bastón que fermentan lactosa con formación de gases antes de 48 horas a 35 °C” (Henry & Heinke, 1999) este grupo se compone por *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia* *Edwardsiella* y *Citrobacter*. Los **Coliformes Fecales** (CF) conformado principalmente por *Escherichia coli*, debido a que su existencia en el agua de bebida se asocia con la presencia de

organismos patógenos causantes de graves problemas de salud. Generalmente este tipo de organismos son excretados del tracto intestinal humano en cantidades que varían entre 100 y 400 billones de Coliformes por día, además de otros tipos de bacterias. (Ramos Olmos, Sepúlveda Marqués, & Villalobos Moreto, 2003).

De acuerdo al origen de algunas bacterias coliformes se ha llegado a diferenciar entre coliformes fecales y totales, donde los fecales tienen capacidad de fermentar lactosa a 44.5°C y son exclusivamente de origen fecal como es el caso de la *Escherichia coli*, cuya presencia es indicadora inobjetable de contaminación fecal e indecible en agua potable.

El recuento de indicadores bacterianos se lleva a cabo por medio de dos métodos alternativos: la técnica de fermentación en tubos múltiples, también llamada procedimiento del Número Más Probable (NMP) y el método de la membrana filtrante o método MF (Henry & Heinke, 1999).

**Tabla 2.5:** Medios de cultivo, temperaturas y tiempos de incubación, y color de las colonias de algunas bacterias indicadoras de contaminación (Apella & Araujo, 2005).

Microorganismos	Medio de cultivo	Temperatura y tiempo de incubación	Color de las colonias
Coliformes Totales	Endo	35° C; 24h	Rojo con brillo metálico en superficie
Coliformes Fecales	FC	44.5° C; 24h	Matices de azul
<i>Enterococcus faecalis</i>	KF	41° C; 48h	Marrón
<b><i>Escherichia coli</i></b>	<b>EC</b>	<b>44.5° C; 24h</b>	<b>Blanco crema</b>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Cetrimida	37° C; 72h	Verde

## 2.4 ESCHERICHIA COLI

En 1885 Theodore Escherich, un pediatra alemán, describió por primera vez una bacteria encontrada en las heces de neonatos y niños sanos la cual denominó *Bacterium coli commune*. Posteriormente, en 1919 Castellani y Chalmers la denominaron *Escherichia coli* en su honor (Donnenberg, 2002).

La *E. coli* es la bacteria más encontrada en las materias fecales del hombre y de muchas especies de animales, su nicho ecológico natural es el intestino delgado y grueso, forma parte de la flora nativa intestinal y se encuentra en calidad de saprobio sin causar daño, por el contrario, muchas cepas de *E. coli* producen sustancias que son útiles al hospedero, como son las colicinas que tienen efecto inhibitorio sobre todas las cepas potencialmente patógenas, por tanto, la colonización del intestino es benéfica para el hospedero (Romero Cabello, 2001).

Son bacterias Gram negativas cilíndricas con 1.1 – 1.5  $\mu\text{m}$  de diámetro por 2.0 – 6.0  $\mu\text{m}$  de largo, se disponen aisladas o en parejas. Conforme a la definición general de la familia *Enterobacteriaceae* a la que pertenecen, son bacterias quimioheterótrofas facultativas teniendo los metabolismos fermentativo y respiratorio, no forman esporas, están desprovistas de oxidasa, producen catalasa y  $\beta$ -galactosidasa, pueden ser móviles por flagelos peritricos o inmóviles y normalmente reducen nitrato a nitrito (Faleiro Naves, 2010).

El género *Escherichia* comprende de cinco especies distintas (figura 2.3): *E. coli*, *E. hermanni*, *E. fergusonii*, *E. vulneris* y *E. blattae*. La especie tipo es *E. coli*, además es la única de las cinco con significación clínica. No obstante, *E. hermanni*, y *E. vulneris* han sido involucradas en infecciones de heridas aunque de manera muy ocasional (Blanco, y otros, 2002)

Las principales pruebas fisiológicas que distinguen *E. coli* de las demás especies son la producción de indol, la reacción negativa para el citrato de Simmons, producción de lisina descarboxilasa, y la fermentación de glucosa, lactosa y D-manitol (Scheutz & Strockbine, 2005)

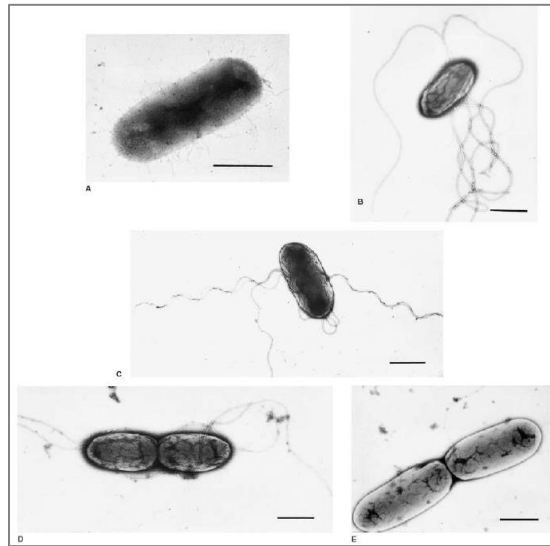
### 2.4.1 Medio y Reproducción

#### Medio

*E. coli* es la especie predominante de la microbiota aerobia y facultativa del tracto gastrointestinal de los animales de sangre caliente y se elimina por las heces al exterior. A pesar

de ser el microorganismo facultativo predominante representa una muy pequeña proporción del contenido total de bacterias en este sitio anatómico. Algunos anaerobios como *Bacteroides spp* son, al menos, veinte veces más abundantes que *E. coli* en el intestino grueso. Sin embargo, por su presencia regular en el intestino y en las heces, *E. coli* es señalada como indicador de contaminación fecal. Se puede encontrar en el medio ambiente, ya que es capaz de sobrevivir algunos días en el agua y en los alimentos, de manera que su aislamiento es un indicador de contaminación fecal (Blanco, y otros, 2002; Todar, 2008).

El intestino humano es colonizado por *E. coli* en las primeras 40 horas tras el nacimiento, se adhiere al moco que recubre el intestino grueso y una vez establecida una misma cepa puede permanecer indefinidamente (Prescott, Harley, & Klein, 2002).

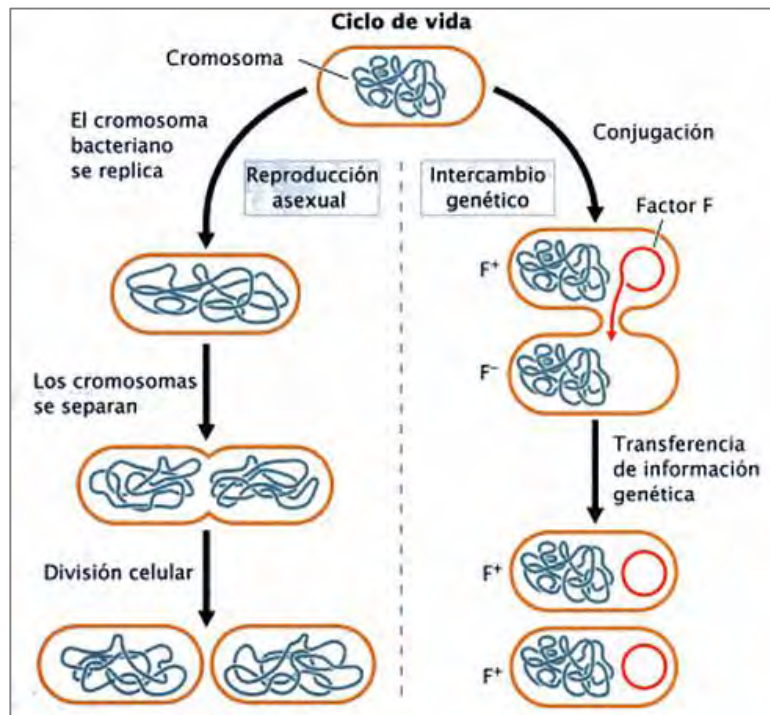


**Figura 2.3:** Fotografías electrónicas de *E. blattae* (a), *E. coli* (b), *E. fergusonii* (c), *E. herman* (d) y *E. vulneris* (e). Barra = 1µm (Scheutz & Strockbine, 2005)

## Reproducción

La *E. coli* de tipo silvestre es protótrofa y puede crecer en un medio mínimo que sólo contenga glucosa y algunas sales orgánicas. En la mayoría de las condiciones se divide una vez por hora, aunque en un medio enriquecido que contenga más azúcares y aminoácidos, se dividirá cada 20 minutos. Por lo general se reproduce por fisión binaria simple, en la cual el cromosoma único de la bacteria se multiplica y migra a los extremos opuestos de la célula, seguido por la división celular, lo que da lugar a dos células hijas idénticas (Pierce, 2009).

El apareamiento entre las bacterias, denominado conjugación, es controlado por genes de fertilidad localizados en el plásmido F, en la conjugación una bacteria dona material genético a otra, seguido por la recombinación genética que integra alelos nuevos al cromosoma bacteriano. Las cepas de *E. coli* también pueden intercambiar material genético a través de la transformación y la transducción (Pierce, 2009).



**Figura 2.4:** Esquema del ciclo de vida de la *Escherichia coli* (Pierce, 2009)

### 2.4.2 Patogenicidad

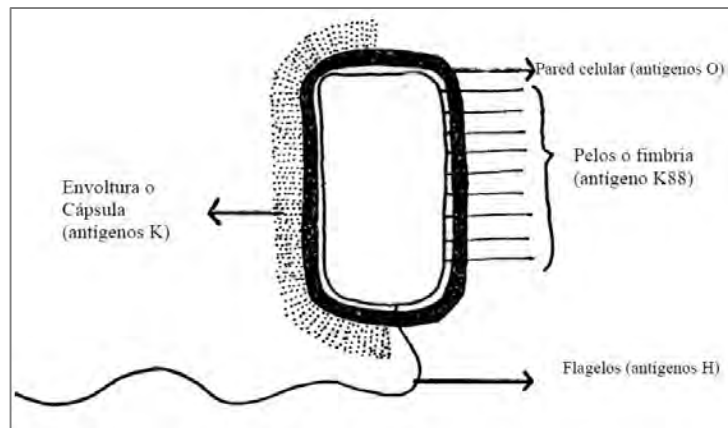
A pesar que la *Escherichia coli* es una bacteria propia del intestino, algunas cepas resultan dañinas para el ser humano al ser ingeridas en alimentos o bebidas contaminadas por heces fecales, causando infecciones entéricas como diarrea, disentería, colitis hemorrágica, o enfermedades extra intestinales como infecciones urinarias, septicemias, meningitis, peritonitis, mastitis, infecciones pulmonares y heridas.

De acuerdo a Blanco, (2002) la *E. coli* provoca en seres humanos del orden de 630 millones de casos de diarrea en el mundo y aproximadamente 775,000 muertes al año, afectando fundamentalmente a la población infantil de países en desarrollo. Además, es el patógeno

oportunista más frecuentemente asociado con infecciones urinarias y septicemias en humanos.

En la década de los 40 del siglo pasado se descubrió que algunas diarreas de los niños se producían por algunos tipos particulares, conocidas como serovariedades o serotipos de *E. coli*. El procedimiento serológico se basa en las diferencias antigénicas (capacidad de producir anticuerpos diferentes), por la superficie y los flagelos de una misma especie. Así, se establecen las serovariedades (Michanie, 2003).

López Álvarez (2012) describe que se han identificado un gran número de serotipos de *E. coli* con base a la presencia de 3 tipos de antígenos denominados: **O**, **K** y **H**. Los antígenos **O** no pueden distinguirse de la fracción antigénica de la endoxina, y se encuentra localizado en la pared celular, constituyendo parte del complejo lipopolisacárido. Existen 153 grupos de antígenos O reconocidos internacionalmente, denominados del 01 al 0157. Los antígenos 031, 047, 067 y 072 no son considerados en el esquema antigénico. Son, termoestables, resistiendo el calentamiento a 100 o 121°C, y son el primer grupo de antígenos que debe determinarse cuando se trata de serotipificar una cepa de *E. coli*. Los antígenos **K** son termolábiles e inhiben la aglutinación con sueros específicos anti-O, ya sea de células vivas o formalinizadas. Se encuentra rodeando a la célula a manera de envoltura, o bien, como cápsula rudimentaria (existe una excepción: el antígeno K88, de naturaleza proteica que existe en forma de pelos o fimbria). Se conocen 3 variedades de antígenos K en base a algunas características físicas, y se les denomina **L**, **B** y **A**. El antígeno K debe ser eliminado por calor cuando se trata de determinar el serogrupo. Existen 91 antígenos K reconocidos internacionalmente, y se denominan K1 al K91. Se reconocen internacionalmente 51 grupos de antígenos **H** o flagelares, denominándose H1 a H53 (105 antígenos H13 y H22 fueron eliminados del esquema antigénico). Son de naturaleza proteica, termolábiles, y no todas las cepas de *E. coli* los poseen.



**Figura 2.5:** Localización de los antígenos O, K y H de la *Escherichia coli* (López Álvarez, 2012)

Las diferentes cepas patógenas de *E. coli* muestran especificidad de huésped, y no sólo eso, sino que poseen atributos de virulencia distintos, lo que resulta en la producción de diferentes enfermedades (López Alegría, 2010), por eso las bacterias patógenas se clasifican de acuerdo al tipo de enfermedad que provocan en el hombre y animales tomando en cuenta criterios clínicos, epidemiológicos y moleculares; en promedio los autores manejan entre 5 y 6 diferentes grupos patógenos de *E. coli* en la tabla 2.6 se enmarcan los principales.

**Tabla 2.6:** Grupos de *Escherichia coli* patógenos según su mecanismo para enfermar (Michanie, 2003)

Tipo o Grupo	Símbolo
<i>E. coli</i> enteropatógenos	ECEP
<i>E. coli</i> enteroinvasivos	ECEI
<i>E. coli</i> productoras de toxinas parecidas a las de las de <i>Shigella</i>	ECST
<i>E. coli</i> enterotóxicos	ECET
<i>E. coli</i> de adherencia difusa	ECDA
<i>E. coli</i> enteroadherentes enteroagregativas	ECEA

***E. coli* enteropatógeno (ECEP ó EPEC):** la principal característica de este grupo es su adherencia a la mucosa intestinal, produciendo el aplastamiento de las vellosidades; los síntomas típicos de este grupo son fiebre, vómitos y diarrea aguda que se presenta principalmente en niños menores de dos años y representa la principal causa de muerte provocada por diarrea en niños de países en vías de desarrollo.

***E. coli* enteroinvasivo (ECEI ó EIEC):** tiene un mecanismo de acción similar al de la *Shigella spp* invadiendo el epitelio del colon, presenta dos mecanismos de transmisión de persona a persona y por ingesta de alimentos y agua contaminada; debido a su mecanismo de transmisión a este grupo se le asocia más con brotes que con casos aislados. Sus principales síntomas son la diarrea acuosa y en algunos casos la disentería con deposiciones de sangre, moco, dolor abdominal, pujo, tenesmo, fiebre elevada y toxicidad sistémica (Ochoa Woodell, 2006).

***E. coli* productoras de toxinas parecidas a las de *Shigella* (ECST ó STEC):** es un tipo de *E. coli* capaz de producir toxinas Shiga y son capaces de adherirse a las células epiteliales del intestino.

Se considera causante de patología grave, en especial en niños, como colitis hemorrágica y el Síndrome Urémico Hemolítico (SUH) (Paton & Paton, 1998; Miliwebsky, y otros, 1999). El reconocimiento de STEC como una clase diferente dentro de los *E. coli* patógenos entéricos resultó de 2 observaciones epidemiológicas. La primera ocurrió en 1983 durante una investigación de brotes de enfermedad intestinal caracterizados por dolor intestinal severo y diarrea acuosa seguida por diarrea con sangre. Esta enfermedad se asoció



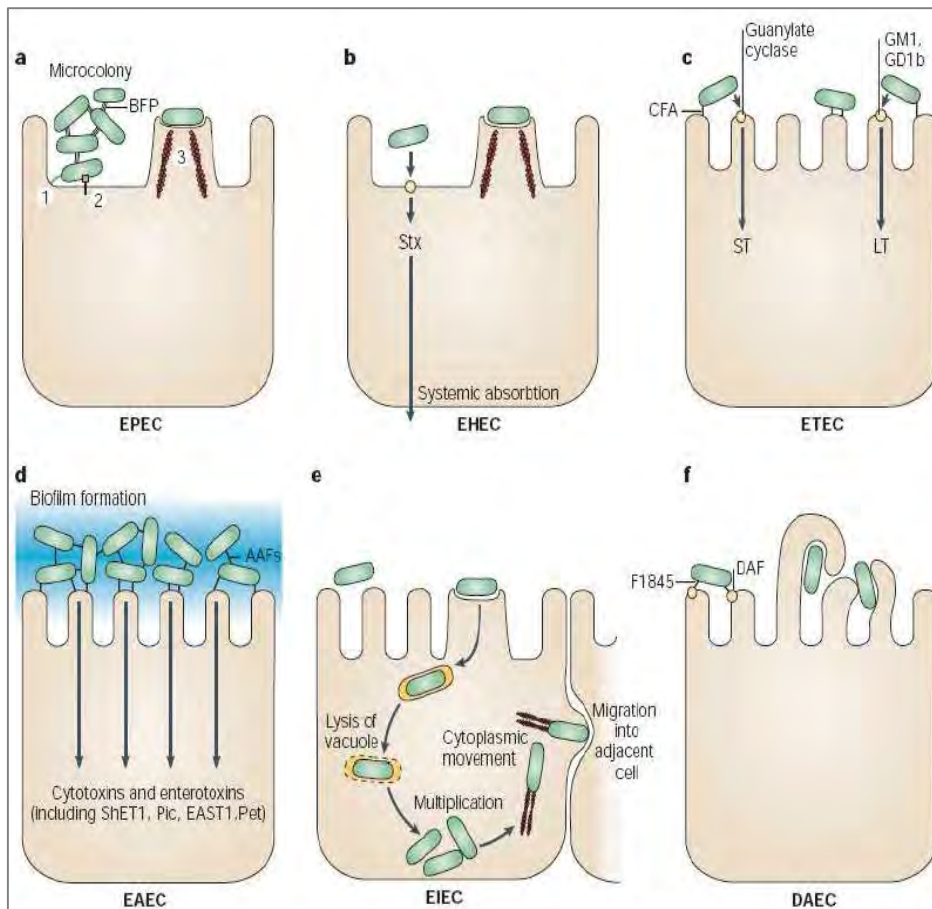
al consumo de hamburguesas poco conocidas en restaurantes de comida rápida. En los cultivos de materiales fecales de los pacientes estudiados se encontró *E. coli* O157:H7 (Wells, y otros, 1983). La segunda observación fue informada en 1985, cuando se publicó la asociación de casa esporádicos de SUH con la presencia de citotoxinas libres en materias fecales y aislamiento de VTEC (*E. coli* verotóxico, productor de toxina activa sobre células Vero) de las heces de estos pacientes (Karmali, 1989).

***E. coli* enterotóxicos (ECET ó ETEC):** producen enterotoxinas termo-lábiles y/o termo estables que causan diarrea aguda (Faleiro Naves, 2010). Este grupo es el causante de la enfermedad “diarrea del viajero” por provocar dolores abdominales, náuseas, vómito, poca fiebre y diarrea acuosa durante máximo una semana.

***E. coli* de adherencia difusa (ECDA ó DAEC):** se define por el tipo de adherencia difusa en cultivos celulares. La excreción asintomática es alta, por lo que es controversial su etiología en diarrea. Sin embargo, en base a estudios realizados en Brasil, parece estar mayormente asociado a diarrea acuosa aguda en niños mayores de 1 año (Scaletsky, y otros, 2002).

***E. coli* enteroadherentes/enteroagregativas (ECEA ó EAEC):** secretan una o más enterotoxinas que producen diarrea secretoria. La diarrea es aguda, acuosa, con fiebre leve y vómitos. Algunos pacientes presentan sangre en las heces. La diarrea puede ser persistente y estar asociada a la desnutrición (Ochoa Woodell, 2006). La EAEC es responsable del 10 al 40% de la diarrea aguda y del 40 al 80% de la diarrea persistente en pacientes con VIH (Huang, Okhuysen, & Jiang, 2004).

De acuerdo a la descripción dada de los 6 patotipos de *E. coli* se hace notar que cada uno tiene una interacción diferente con el huésped, en la figura 2.6 se esquematiza dicha interacción de cada uno de los grupos antes descritos.



**Figura 2.6:** Esquemas de la Patogenicidad de los patotipos intestinales de *Escherichia coli* (Faleiro Naves, 2010).

## 2.5 LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE

Los requisitos para la calidad del agua se establecen de acuerdo al uso al que se le destina; dichos requisitos se encuentran en normas, leyes internacionales, nacionales y estatales, en función de éstas es el tratamiento que deberá seguir el agua bruta para cumplir los parámetros establecidos en dicha legislación, en las siguientes tablas se plasman las leyes, normas y reglamentos que rigen la calidad del agua para su uso y consumo humano.

**Tabla 2.7:** Marco Jurídico Federal y Estatal

<b>Leyes Federales</b>	
<b>Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos</b>	En los artículos 2, 4, 28, 73, 115, 116, 117 y 133 de la constitución completan las normas fundamentales de las que deriva el marco jurídico para prestar los servicios públicos de agua y saneamiento.
<b>Ley de Aguas Nacionales</b>	Como principio básico, la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales destinadas al servicio público urbano sólo pueden llevarse a cabo mediante el título de asignación que se otorga a los municipios o estados, por lo que en esta ley se establece de forma clara los derechos que le corresponden a la población sobre estas aguas
<b>Ley Federal de Derechos</b>	Se fincan los derechos (contribuciones fiscales) que se deben pagar por el uso o aprovechamiento de los bienes del dominio público de la Nación. En la regulación sustantiva se establece que <i>“Están obligados al pago del derecho sobre el agua, las personas físicas y morales que usen, exploten o aprovechen aguas nacionales, bien sea de hecho o al amparo de títulos de asignación, concesión, autorización o permiso, otorgados por el gobierno Federal, de acuerdo a la zona de disponibilidad de agua en que se efectúe su extracción de conformidad a la división territorial contenida en el artículo 231 de esta Ley”</i> .
<b>Ley General de Salud</b>	Regula el acceso y modalidades de los servicios de salud; dentro de los objetivos de esta ley establecidos en el artículo sexto se encuentran <i>“Apoyar el mejoramiento de las condiciones sanitarias del medio ambiente que propicien el desarrollo satisfactorio de la vida”</i> y el objetivo séptimo <i>“Promover un sistema de fomento sanitario que coadyuve al desarrollo de productos y servicios que no sean nocivos para la salud”</i>
<b>Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente</b>	Para las cuestiones ambientales es el máximo régimen legal después de la Constitución y donde se establecen las bases para <i>“Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar”</i> .

<b>Leyes Estatales</b>	
<b>Ley de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo</b>	Esta ley establece las bases para la regulación estatal sobre la administración y prestación de servicios del agua potable y alcantarillado del estado. En ella se establece las actividades y funciones de los servicios públicos de agua potable, de entre las cuales se encuentra la distribución del agua potable así como la vigilancia, mantenimiento, operación y reparación de las plantas de potabilización.
<b>Ley de Salud del Estado de Quintana Roo</b>	Tiene por objeto <i>“Reglamentar el derecho a la protección de la salud, establecer las bases y modalidades de acceso a los servicios de salud proporcionados por el Estado y la concurrencia de éste y sus municipios en materia de salubridad local”</i> , en el título decimo primero capítulo VII de esta ley se establecen las bases del agua potable y alcantarillado en materia de salud.

**Tabla 2.8:** Normas Oficiales Mexicanas

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
<b>NOM-127-SSA1-1994</b>	“Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su Potabilización”. Que se encuentra vigente desde el 30 de noviembre de 1995 y cuya modificación se dio el 20 de octubre de 2000.
<b>NOM-244-SSA1-2008</b>	“Equipos y sustancias germicidas para tratamiento doméstico de agua. Requisitos sanitarios.” Publicada en el diario oficial de la federación el 01 de agosto de 2003.
<b>NOM-001-CONAGUA-2011</b>	“Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-hermeticidad-especificaciones y métodos de prueba”. Aprobada el 28 de noviembre de 2011
<b>NOM-002-CONAGUA-1995</b>	“Toma domiciliaria para el abastecimiento de agua potable-especificaciones y métodos de prueba”. Aprobada el 20 de marzo de 1996.
<b>NOM-013-CONAGUA-2000</b>	“Redes de distribución de agua potable-especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba”. Aprobada el 20 de junio de 2002

## 2.6 POTABILIZACIÓN DE AGUA

De acuerdo a lo expuesto en temas anteriores podemos concluir que es prácticamente imposible encontrar agua pura en las fuentes naturales, lo que ha provocado que a lo largo de los años, surjan enfermedades crónicas y agudas en el ser humano por ingerir agua sin tratamiento previo.

Para reducir índice de mortandad por enfermedades relacionadas con el agua, se han diseñado y construido plantas de potabilización que se ajusten a los parámetros establecidos a nivel nacional e internacional y que se adapten al tipo de agua a tratar. Por tal motivo, en cada región la duración y los procesos para la potabilización varían, sin embargo en general pasan por tratamientos similares.

### 2.6.1 Descripción completa del proceso

Le decimos potabilización a la transformación de agua común en agua potable apta para el uso y consumo humano. Dicha transformación consta de diferentes procesos y tratamientos, con el objetivo de garantizar al consumidor que se alcanzará la calidad exigida por las autoridades sanitarias.

Previo al proceso de potabilización se deben considerar tres aspectos del agua cruda, los componentes o impurezas a eliminar, los parámetros de calidad y los grados de tratamiento, de acuerdo a estos aspectos se desarrollaron procesos unitarios en función de los contaminantes presentes en el afluente, los cuales se describen en la tabla 2.9.

**Tabla 2.9:** Procesos unitarios en función de los contaminantes presentes en el agua cruda  
 (American Water Works Association, 2002)

TIPO DE CONTAMINANTE	OPERACIÓN UNITARIA
Sólidos gruesos	Desbaste
Partículas coloidales	Coagulación, decantación y decantación
Sólidos en suspendidos	Filtración
Materia orgánica	Afino con carbón activado
Amoniaco	Cloración al breakpoint
Gérmenes patógenos	Desinfección
Metales no deseados	Precipitación por oxidación
Sólidos disueltos	Ósmosis inversa

Las aguas destinadas para el consumo humano, se clasifican en tres diferentes tipos, de acuerdo a su grado de contaminación, lo que determina el tipo de tratamiento por el cual pasará.

- Tipo A1: Tratamiento físico simple y desinfección
- Tipo A2: Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección

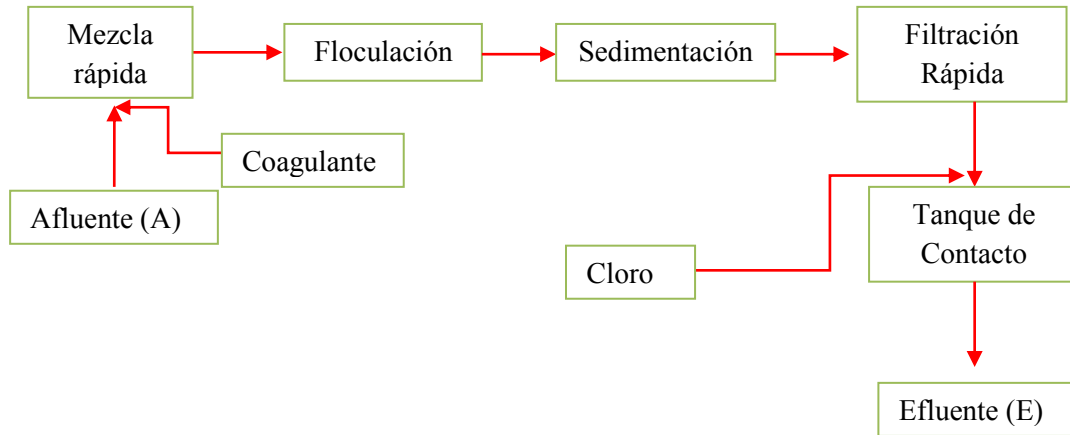
- Tipo A3: Tratamiento físico y químico intensivo, afino y desinfección

La descripción del proceso de potabilización completo se da en la tabla 2.10.

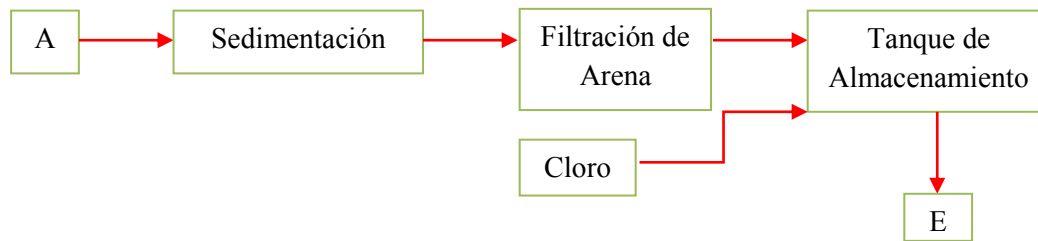
**Tabla 2.10:** Procesos de potabilización de agua (Romero Rojas, 1999)

<b>PROCESO</b>	<b>PROPÓSITO</b>
<b><i>TRATAMIENTO PRELIMINAR</i></b>	
<b>Cribado</b>	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
<b>Pre-tratamiento químico</b>	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
<b>Aforo</b>	Medida de agua cruda a tratar.
<b><i>TRATAMIENTO PRINCIPAL</i></b>	
<b>Aireación</b>	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
<b>Coagulación/floculación</b>	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
<b>Sedimentación</b>	Remoción de sólidos sedimentables.
<b>Ablandamiento</b>	Remoción de dureza.
<b>Filtración</b>	Remoción de sólidos finos, flóculo en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
<b>Adsorción</b>	Remoción de sustancias orgánicas y color.
<b>Estabilización</b>	Prevención de incrustaciones y corrosión.
<b>Fluoruración</b>	Prevención de caries dental
<b>Desinfección</b>	Exterminio de organismos patógenos

Las figuras 2.7 y 2.8 esquematizan dos trenes de tratamiento, el primero completo y el segundo para una planta pequeña.



**Figura 2.7:** Planta de coagulación y filtración convencional para remoción de color, turbidez y microorganismos (Romero Rojas, 1999)



**Figura 2.12:** Planta para un suministro pequeño con agua cruda de buena calidad (Romero R. 1999)

### 2.6.2 Desinfección

Debido a lo pequeño de los microorganismos, no es posible garantizar que su remoción sea completa con los tratamientos de coagulación o filtrado. Por esa razón, es necesario efectuar una desinfección para asegurar la eliminación de microorganismos potencialmente dañinos en las aguas potables (Tebbutt, 1990).

La desinfección es un proceso selectivo, no destruye todos los organismos presentes en el agua y no siempre elimina todos los organismos patógenos. Por eso requiere de procesos previos que los eliminen mediante coagulación, sedimentación y filtración (Barrenechea Martel & Cánepa de Vargas, Capítulo 10: Desinfección, 2004). Al hablar de la eliminación de los microorganismos, se deben distinguir cuatro términos:

- a) *Agente esterilizante*: es aquel capaz de destruir completamente todos los organismos (patógenos o no).
- b) *Desinfectante*: es el agente que inactiva los agentes patógenos.
- c) *Bactericida*: agente capaz de inactivar bacterias.
- d) *Cisticida*: agente que tiene la capacidad de inactivar los quistes.

En el proceso de potabilización de agua la desinfección cumple dos objetivos específicos: reducir la contaminación inicial de microorganismos y la desinfectar después del proceso para la eliminación final de los patógenos.

### 2.6.3 Teoría de la Desinfección

Teóricamente la acción desinfectante de las sustancias químicas se realiza en dos etapas: la penetración de la pared celular y la reacción con las enzimas, inhibiendo el metabolismo de la glucosa y, por tanto, provocando la muerte del microorganismo.

#### Factores que influyen en la desinfección

La eficiencia del desinfectante depende de la combinación de diversos factores como el tipo de organismo a eliminar, pH, temperatura y tiempo de exposición al desinfectante. De acuerdo a Richter (1984) la velocidad de desinfección está dada por la siguiente fórmula:

$$-KN = \frac{dN}{dt} \qquad \text{ecuación 2.3}$$

Donde:

K= tasa de mortalidad, constante para un determinado desinfectante

N= número de organismos vivos en el instante t

Dicha fórmula es comúnmente conocida como la *Ley de Chick*, donde notamos que, para que la desinfección sea eficaz es importante el tiempo de contacto, el cual se convierte en un factor decisivo al momento de la eliminación de microorganismos, debido a que si aumentamos el tiempo de contacto mayores serán las posibilidades de erradicar las bacterias contaminantes en el agua.



a) *Los organismos presentes y su comportamiento*

El tipo de microorganismo presente en el agua influye en la eficiencia del desinfectante debido a que cada especie presenta diferentes resistencias en la membrana protectora, se pensaría que el número sería un factor a considerar, sin embargo diversos autores han discutido y concluido que el número de organismos presentes puede variar sin afectar el proceso de desinfección, siempre y cuando el pH y temperatura del agua no cambien.

b) *El tiempo de contacto*

El tiempo de contacto se convierte en un factor decisivo al eliminar microorganismos del agua, pues a mayor tiempo de contacto aumentan las posibilidades de destrucción de los patógenos para una dosis dada.

Puede variar dependiendo de la concentración del desinfectante, pues a mayor concentración de desinfectante menor será el tiempo de contacto, caso contrario que si fuera una dosis débil el tiempo de contacto se extiende.

Jaramillo Cazco (2010) presenta en su trabajo la expresión de Watson para estimar el tiempo de contacto, donde presenta una relación entre una constante y la concentración del desinfectante.

$$t = K/C^n \qquad \text{ecuación 2.4}$$

Donde:

K= Constante de Desinfección

C= Concentración del desinfectante, en mg/L

n= Coeficiente que expresa la eficiencia bactericida del desinfectante y que se conoce como el coeficiente de disolución

En la tabla 2.11 se presenta las constantes, empleadas en la ecuación de Watson, en función del organismo y el desinfectante a emplear.

**Tabla 2.11:** Valores de K para ciertos organismos

Organismo	HOCl	OCl	NH <sub>2</sub> Cl
<i>E. coli</i>	<b>0.24</b>	<b>15.6</b>	<b>66.0</b>
Virus de poliomielitis	1.2	-----	-----
Virus coxsakie A2	6.3	-----	-----

c) *La temperatura del agua*

Generalmente esta propiedad física ayuda al proceso de desinfección, sin embargo cuando este proceso se da mediante un agente en estado gaseoso, este parámetro influirá en la efectividad de la desinfección, debido a que la solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura, lo que causará variaciones en la concentración del mismo.

Según Jaramillo Cazco (2010), cuanto más caliente esté el agua más eficiente y más rápida será la desinfección, y por tanto la constante K aumentará. La expresión que relaciona la constante con la temperatura considerada, con el valor de la misma a 20°C es la siguiente:

$$K = K_{20} (1 + \theta)^{(T-20)} \quad \text{ecuación 2.5}$$

Donde:

K= Constante de la desinfección a T °C

K<sub>20</sub>= Constante a 20° C

T= Temperatura en °C

θ= Factor que varía entre 0.06 y 0.08

c) *El pH*

El pH ideal en el agua a tratar varía de acuerdo al tipo de desinfectante a emplear pues de acuerdo a sus propiedades químicas éstos tienen un pH óptimo para eliminar microorganismos del agua, de acuerdo a diferentes autores en la literatura, se plantea en las

aguas alcalinas el tiempo de contacto y dosis del desinfectante es mayor de acuerdo al grado de alcalinidad que presenta.

## **2.6.4 Medios de Desinfección**

### **a) Desinfectantes Físicos**

Los mecanismos más empleados para la desinfección de agua son calor, filtración y radiación ultra violeta, los cuales se describen a continuación.

#### *Calor*

La gran mayoría de los microorganismos son sensibles a las altas temperaturas, por lo que al aplicar calor a su medio, éste se vuelve hostil para su supervivencia y la población empieza a decrecer hasta eliminar por completo los organismos presentes en el agua. Este método de desinfección es considerado domiciliario debido a que en la vida diaria es recurrente en aquellas poblaciones donde no tienen acceso a una buena calidad de agua, la potabilizar hirviéndola. Los costos de este medio de desinfección son bajos lo que le da una ventaja para ser empleado, sin embargo este desinfectante que deja un sabor peculiar en el agua, por la expulsión de gases durante la ebullición y no presenta garantía frente a una recontaminación, por lo que se debe tener cuidado al momento de almacenar el agua tratada.

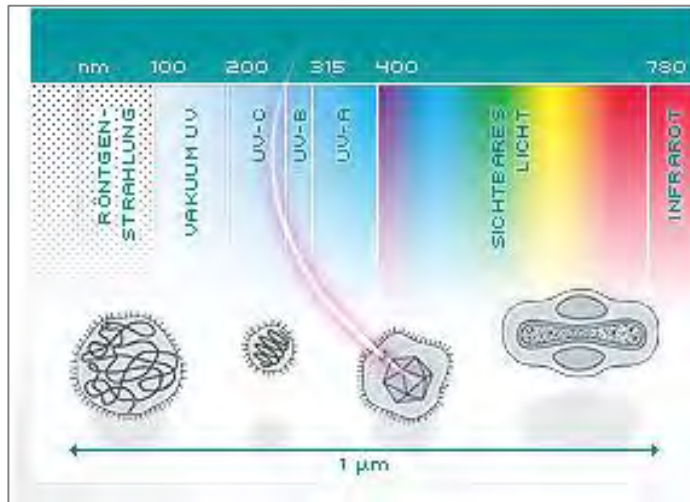
#### *Filtración*

La filtración es más conocida para la remoción de turbiedad en el agua, sin embargo al adecuarla puede resultar en un proceso eficiente para la eliminación de bacterias no deseables en el agua para el consumo humano. De acuerdo al trabajo realizado por Pérez Castillo (2008) la filtración incluye la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y la osmosis inversa cuyas propiedades de desinfección dependerán de la capacidad que tenga cada una para “retener” los microorganismos patógenos.

Una de las ventajas de utilizar este método de desinfección es que presenta un porcentaje alto de remoción de bacterias y suele ser más efectivo en organismos más grandes como diatomeas y algas; sin embargo no se logra eliminar del agua los sabores y olores asociados a estos organismos, además de ser un proceso costoso.

#### *Rayos Ultravioleta*

Además de los múltiples usos que tiene la luz ultravioleta, actualmente éste método está siendo usado para la desinfección de agua, debido a que una de sus longitudes de onda es reconocida por su efecto germicida.



**Figura 2.9:** Espectro Radiación UV (PURION, 2011)

La luz ultravioleta (luz UV) la podemos dividir en 4 áreas dependiendo de su longitud de onda, la primera la llamamos UV vacío que va de los 10 a los 200 nanómetros (nm), el efecto germicida de la radiación comienza en la región UV-C que es a partir de los 200 a los 295 nm cuya longitud es de onda corta, seguida por una longitud de onda mediana conocida como la región UV-B la cual va de los 295 a 325 nm la cual parte de ella es encontrada en la radiación solar y empleada comúnmente en lámparas, por último tenemos la región de UV-A o de onda larga que se encuentra entre los 325 y 390 nm la cual es representada por la radiación solar. Como se muestra en la figura 2.9, la eliminación de cada microorganismo depende de la longitud de onda al cual es sometido.

La radiación UV-C es generada por el sol pero no es manejable por el hombre. Dicha radiación es generada mediante lámparas que emiten luz UV como resultado de un flujo de corriente (arco foto voltaico), a través de vapor de mercurio a baja presión, entre los electrodos de la lámpara, produciendo la mayor parte de su emisión a 253.7 nm (González Garrido, 2001)

La eficiencia de la desinfección mediante este método dependerá si el agua a tratar contiene compuestos que puedan evitar la penetración directa de la radiación, como fenoles y compuestos aromáticos o partículas suspendidas que impidan el paso de la luz.

Se informa que las exposiciones de la *Escherichia coli* a 3,000, 1,500 y 750 mw-seg por  $\text{cm}^2$ , producen 99.99, 99 y 90% de mortandad. (Fair, Geyer, & Okun, 1996)

Dentro de las ventajas de usar UV como agente desinfectante se encuentra el bajo costo, no crea subproductos, no necesita atención ni medición especial, es más efectivo que el cloro para la eliminación de virus, no altera el sabor ni olor, entre otras (Jaramillo Cazco, 2010).

Por otro lado la gran desventaja de este método de desinfección es que actúa de forma puntual, es decir, no deja efecto residual en el agua tratada, por lo que el agua abastecida a la población no sería cien por ciento segura, pues se podría contaminar en la red de tuberías utilizadas para su abastecimiento.

#### *Método SODIS*

Este proceso combina las ventajas de dos medios físicos de desinfección, el calor y la radiación UV. El método SODIS (Solar Water Disinfection, por sus siglas en inglés), es un sencillo proceso de tratamiento que permite mejorar la calidad del agua y fue desarrollado en Dubendorf, Suiza (Wegelin, 2002). El cual, consiste en colocar dentro de botellas de plástico transparente fabricadas con politereftalato de polietileno (PET) agua contaminada y someterlas a la exposición solar entre 5 y 6 horas. La luz solar desinfecta el agua y mata a los agentes causantes de enfermedades gastrointestinales, gracias a la combinación de los dos efectos descritos anteriormente, el proceso se muestra en la figura 2.10. Para que el método funcione eficazmente, es necesaria la exposición de tiempo descrita anteriormente y debe someterse bajo una radiación de al menos  $500 \text{ Wh/m}^2$ . El efecto conjunto de la radiación y de la temperatura se produce cuando el agua supera los  $50^\circ\text{C}$ , momento a partir del cual el proceso de desinfección requiere un tercio de la radiación. El agua es apta para el consumo tras una hora de exposición a más de  $50^\circ\text{C}$  (Fernández, 1998).



**Figura 2.10:** Método SODIS

Las ventajas de utilizar este método de desinfección son los bajos costos de aplicación además de ser accesible al usuario, sin embargo presenta las mismas desventajas que la desinfección por calor y radiación UV, además de ser un proceso lento, solo es aplicable a pequeños volúmenes de agua y no cambia la calidad química del agua.

## b) Desinfectantes Químicos

El empleo de agentes químicos para la desinfección son los más empleados en la práctica debido a los bajos costos que implica tratar grandes volúmenes de agua en comparación con los agentes físicos descritos anteriormente.

Antes de emplear cualquier tipo de desinfectante se deben tener las siguientes consideraciones:

- a. Debe de ser capaz de mantener un tiempo de contacto razonable independiente de la cantidad de microorganismos y condiciones del agua.
- b. No debe dar olor, color o sabor al agua ni debe ser tóxico para cualquier organismo vivo.
- c. El costo debe ser accesible y su empleo y manejo deben ser seguros
- d. Debe presentar efecto residual para prevenir futuras recontaminaciones en el abastecimiento.

Ciertos metales pesados, ácidos minerales y bases, agentes superficialmente activos, halógenos, ozono, peróxidos y permanganato se utilizan en gran parte para el tratamiento de agua. El cloro y sus derivados, son los desinfectantes químicos más usados para la desinfección de agua. (Walter & Weber, 1979)

### *Agentes Oxidantes*

Al oxidarse las enzimas se produce automáticamente la muerte de la bacteria; los virus de igual forma son atacados por estos agentes oxidantes aunque no tienen una tasa de éxito grande en comparación con las bacterias, sin embargo la correcta eliminación de los virus dependerá de los procesos previos a la desinfección (Barrenechea Martel & Cánepa de Vargas, Capítulo 10: Desinfección, 2004).

### Ozono

Es un agente altamente oxidante que le proporciona características como un desinfectante efectivo, por lo que en la actualidad en los países desarrollados el ozono se está perfilando como un serio competidor frente al cloro por costo de producción y su alta efectividad al desinfectar.

De acuerdo a Barrenechea y Cánepa (2004) las dosis necesarias para desinfectar el agua varían según la calidad de la misma:

- Para aguas superficiales de buena calidad bacteriológica, luego de la filtración, se requieren de 2 a 3 mg/L de ozono.
- Para aguas superficiales contaminadas, luego de la filtración, se debe de aplicar entre 2.5 y 5 mg/L.

La desinfección con ozono es el método menos utilizado en los Estados Unidos aún cuando en Europa esta tecnología ha tenido una gran aceptación por varias décadas. El tratamiento con ozono tiene la capacidad de lograr niveles de desinfección más altos en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; sin embargo los costos de inversión así como los costos de mantenimiento no son competitivos con las alternativas disponibles. Por lo tanto, el ozono es utilizado con poca frecuencia, principalmente en casos en los cuales las otras alternativas no son efectivas (United States Environmental Protection Agency, 1999).

### *Alógenos*

#### Yodo

El yodo no forma yodaminas con el amoníaco, si bien no reacciona con los fenoles como el cloro, éste produce un sabor medicinal en el agua en concentraciones mayores a 1 mg/L. Al mezclarse el I<sub>2</sub> con el agua se disocia formando ácido hipoyodoso HOI (Jaramillo Cazco, 2010).

De acuerdo a estudios realizados por Chang (1968) una dosis de 0.55 mg/L de yodo produce la muerte del 99.99% de *Escherichia coli* en un minuto, resultando más efectivo que el cloro para eliminar Coliformes.

Entre sus desventajas está que presenta un sabor desagradable, su costo de aplicación es alto y presenta efectos perjudiciales en la salud humana, ya que este halógeno desarrollará problemas en el corazón y tiroides.

#### Bromo

Este desinfectante no se emplea de forma usual en el proceso de desinfección de agua potable, su principal aplicación está en la desinfección de agua en piscinas.

Siendo un halógeno, el bromo reacciona de una forma similar a la del cloro, ya que al disolverlo en agua, forma ácido hipobromoso (HOBr) cuyo poder de desinfección es alto, en comparación con otros desinfectantes, y es menor en comparación con la acción del ácido hipocloroso (HOCl). Actúa penetrando las membranas de las células de los microorganismos “desorganizando” su estructura y deteniendo el proceso metabólico, lo que lleva a la muerte del microorganismo. Uno de los efectos de la presencia del bromo en el agua, es que al igual que el cloro, forma Trihalometanos y si hay presencia de ácidos

fúlvicos y amoniaco, forma bromoformo, compuestos que son cancerígenos y presentan un riesgo a la salud del ser humano.

Este compuesto al ser líquido en temperatura ambiente tiene la ventaja de ser ampliamente manipulable, lo que facilita su dosificación en comparación con la del cloro, sin embargo su aplicación resulta impráctica debido a que los costos de operación resultan ser 5 veces más altos que la del cloro.

### 2.6.5 Cloración

La desinfección por medio de la cloración actualmente es el método más utilizado en los procesos de potabilización.

Se usa ampliamente debido a las siguientes razones:

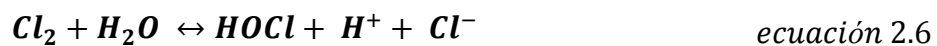
1. Se obtiene fácilmente como gas, líquido o polvo.
2. Es barato.
3. Es fácil aplicar debido a una solubilidad relativamente alta (7000 mg/L).
4. Deja efecto residual para la distribución del agua.
5. Es muy tóxico para la mayoría de los microorganismos, ya que detiene las actividades metabólicas.

El cloro se empezó a usar como desinfectante en agua para consumo humano hace más de 90 años, siendo el principal factor en la reducción de la mortandad por enfermedades diarreicas como el cólera y otras tantas como la hepatitis A o la tifoidea.

Robert Koch en 1881 demostró, bajo condiciones controladas de laboratorio, que el hipoclorito podía destruir cultivos puros de bacterias, y detonó una serie de investigaciones en torno al poder desinfectante del cloro.

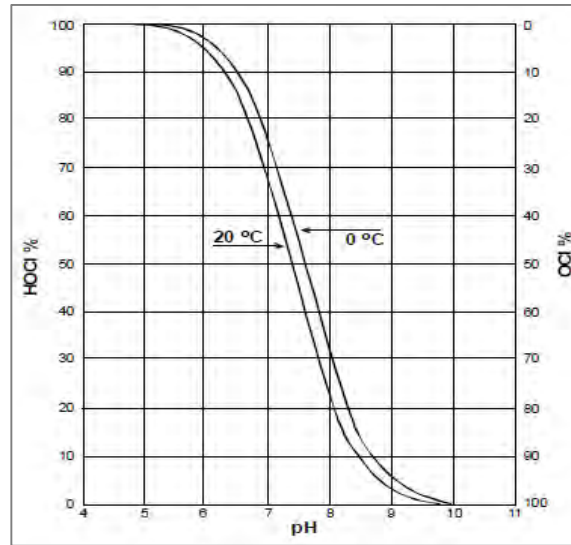
#### *Interacción del cloro en el agua*

1. Reacciones de hidrólisis.





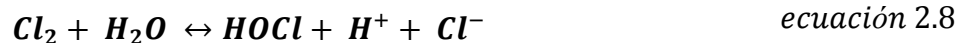
La ecuación 2.4 nos describe la reacción de hidrólisis al agregar cloro al agua, cuyo objetivo es la formación del cloro activo libre, dicha reacción sucede en dos momentos, el primero donde el cloro al entrar en contacto con el agua formará ácido hipocloroso (HOCl) y clorhídrico, momentos después de esta reacción se da la ionización del HOCl resultando el ión hipoclorito (OCl<sup>-</sup>), quien junto con el ácido hipocloroso formarán el compuesto buscado.



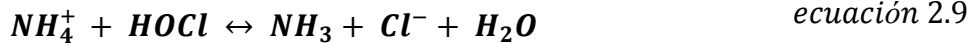
**Figura 2.11:** Cantidades relativas de HOCl y OCl<sup>-</sup> en diferentes valores de pH (Barrenechea Martel & Cánepa de Vargas, Capítulo 10: Desinfección, 2004)

En la figura 2.11 se muestra la relación de la concentración del HOCl y OCl<sup>-</sup>, la cual depende directamente del pH, pues en aguas principalmente básicas (pH mayores a 7) encontraremos principalmente OCl<sup>-</sup>, por el contrario en aguas ácidas (pH igual o menor a 5) la concentración de HOCl será mucho mayor, ambos compuestos poseen acción desinfectante, sin embargo, el HOCl es más eficiente en la destrucción de los microorganismos que el hipoclorito, por lo que la desinfección con cloro será más efectiva a un pH bajo

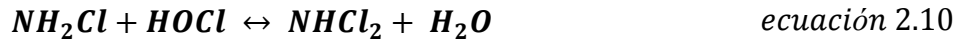
## 2. Reacciones con el amoníaco



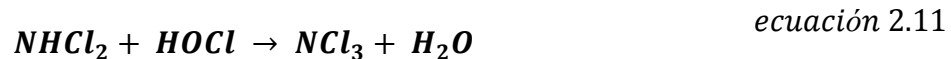
- Formación de monocloraminas ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ )



- Formación de dicloroaminas ( $\text{NHCl}_2$ )

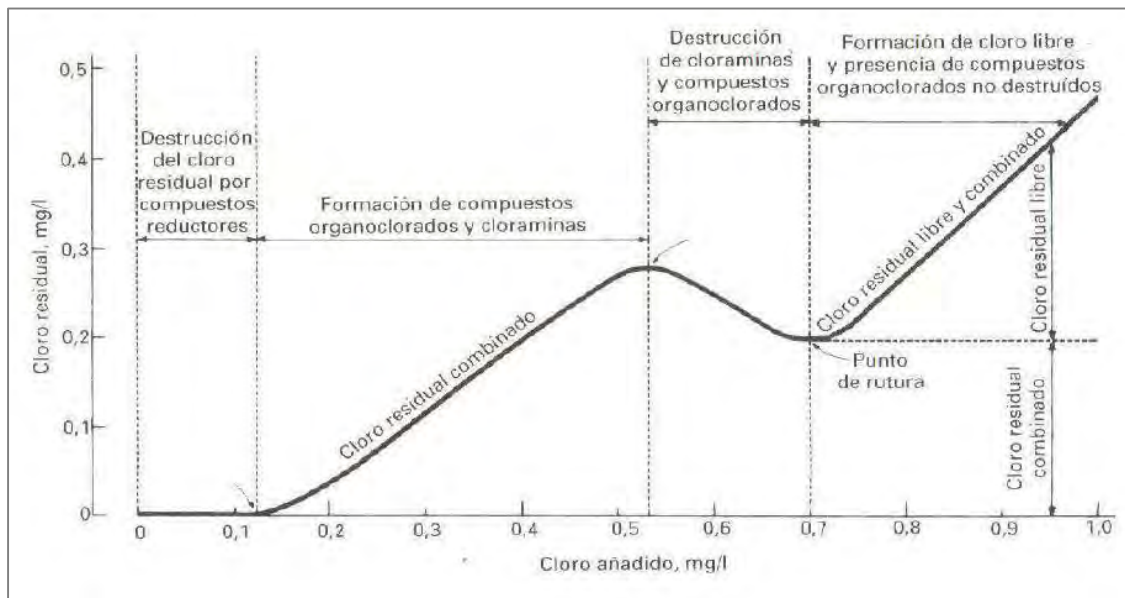


Las dicloroaminas formadas no son estables y se descomponen de acuerdo a la siguiente reacción:



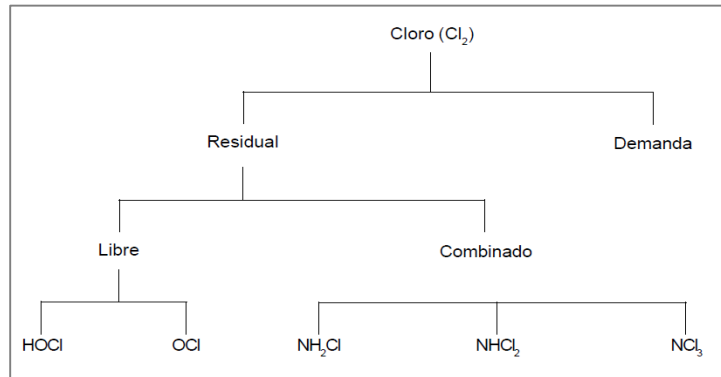
Estas formas de cloro constituyen el **cloro libre combinado** (Metcalf & Eddy, 1995). La cantidad de cloro libre a utilizar para la desinfección de agua, se puede determinar mediante dos métodos, llamados **punto de ruptura** o **break point** e **índice de cloro** o **demanda de cloro** (Catalán, 1990).

El **punto de ruptura** es la dosis de cloro a partir de la cual se destruyen los compuestos formados por el cloro y la materia orgánica (figura 2.12). La **demanda de cloro** es la cantidad mínima de cloro con que es necesario tratar un agua para que, después de haberse producido la desinfección, queden ligeros vestigios de cloro libre al cabo de un determinado tiempo (Canche Uuh, 2007).



**Figura 2.12:** Curva generalizada del punto de ruptura o break point (ACQUATRON S.A., 2011)

La distribución en el agua entre uno y otro tipo de cloramina depende del pH, la temperatura y la proporción que existe entre el cloro y el amoniacado expresado como nitrógeno. La proporción teórica que debe existir para que todo el cloro reaccione con el amoniacado debe ser de 5 a 1 en peso (Jaramillo C. 2010).



**Figura 2.17:** Formas importantes del cloro en el agua (Barrenechea Martel & Cánepa de Vargas, Capítulo 10: Desinfección, 2004)

### 3. Reacciones con la materia orgánica y otros compuestos químicos

El poder oxidante del cloro dependerá del compuesto químico u orgánico con el cual reaccione, por ejemplo su capacidad para producir cloruros, ácido clorhídrico o compuestos órgano clorados se ve afectada por la presencia de nitrógeno orgánico.

Se consideran compuestos tóxicos para los peces y el ser humano a aquellos aminoácidos que son resistentes a la oxidación por cloro y quedan como aminoácidos clorados.

### 4. Reacciones con compuestos orgánicos

El cloro reacciona con compuestos orgánicos en el agua y forma compuestos organohalogenados, siendo los principales los **Trihalometanos** (THMs), especialmente el cloroformo que es un compuesto cancerígeno (Jaramillo Cazco, 2010). Factores que afectan la eficiencia de la cloración

- Turbiedad: hace más lenta la acción del cloro, lo que provoca aumentar el tiempo de contacto o la concentración del cloro.
- Temperatura: las temperaturas bajas afectan considerablemente la eficiencia del cloro como desinfectante.

- Calcio: la razón por la que el calcio interfiere en la desinfección se debe a que las bacterias, cuya carga es negativa, absorben los iones bivalentes de Ca y forman costras protectoras alrededor de ellas.
- pH: un alto pH en el agua desaceleran las reacciones químicas entre el amoníaco y el cloro, induce la formación de compuestos clorados de baja efectividad, por esta razón el agua a tratar se debe alcalinizar antes del proceso y no después de él.
- Fenoles: actúa con el cloro para formar compuestos como el clorofenol y diclorofenol, los cuales le proporcional al agua sabor a yodoformo.

### 2.6.6 Aspectos toxicológicos de la cloración

La cloración es el paso más importante en el proceso de potabilización (Gopal, Tripathy, Bersillon, & Dubey, 2007), sin embargo el cloro reacciona con la materia orgánica natural creando subproductos que pueden resultar dañinos para el ser humano, como los fenoles, que al entrar en contacto con el cloro dan como resultado los clorofenoles que le proporcionan al agua un sabor muy desagradable. Incluso se han detectado subproductos de la cloración (SPCs) como cancerígenos, mutagénicos, teratógenos o tóxicos cuando el cloro reacciona con algunos compuestos orgánicos.

Los SPC más estudiados son los THMs, ya que fueron los primeros subproductos reportados en agua de bebida (Ashbolt, 2004), y son resultado de la interacción del cloro con las plantas (ácido fúlvico y húmico, productos de la degradación orgánica), algas (aminoácidos y pirimidinas, triptofanos) y los desechos industriales (fenoles). El segundo grupo de subproductos de cloración más estudiado son los **ácidos Haloacéticos (AHA)**. Los compuestos que reaccionan con el cloro se les conocen como precursores y en general cumplen con la siguiente reacción:

**Cloro residual libre + precursores  $\leftrightarrow$  THMs + subproductos** ecuación 2.12

#### *Trihalometanos*

Los principales Trihalometanos son el cloroformo, bromodichlorometano, dibromoclorometano y el bromoformo.

Según un estudio realizado por Wang, Deng, & Lin (2007) sobre la evaluación del riesgo de cáncer por Trihalometanos en agua de bebida nos dicen que los resultados revelaron que el mayor riesgo proviene de la exposición por la inhalación de cloroformo durante el baño o ducha.

Al respecto organismos internacionales como OMS publicó en 1993 unas guías con límites máximos permitidos para algunos SPC incluyendo THMs, AHA, los haloacetronitilos

(HANs), donde la suma de los THMs no debería exceder a 1mg/L, sin embargo muchas de esas guías no fueron reconocidas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) y por Canadá, y fue hasta 2001 que la USEPA y Canadá publicaron la concentración máxima permitida para los THMs en el agua de bebida de 0.10 mg/L. la tabla 2.12 describe con amplitud estos límites.

**Tabla 2.12:** Guías relacionadas con SPC (mg/l) (Sadiq & Rodriguez, 2004)

Compound	Acronym	WHO (1993)	USEPA (2001a)	Health Canada (2001)	Aus.NZ (2000)	UK (2000)
Trichloromethane (chloroform)	TCM	0.200	0.000*			
Bromodichloromethane	BDCM	0.060	0.060*			
Dibromochloromethane	DBCM	0.100	0.000*			
Tribromomethane (bromoform)	TBM	0.100	0.000*			
Total trihalomethanes	TTHM	≤1	0.080	0.100	0.250	0.100
Chloroacetic acid					0.150	
Dichloroacetic acid	DCAA	0.050			0.100	
Trichloroacetic acid	TCAA	0.100			0.100	
Haloacetic acids	HAAS		0.060	**		
Dichloroacetonitrile	DCAN	0.090				
Trichloroacetonitrile	TCAN	0.001				
Dibromoacetonitrile	DBAN	0.100				
Haloacetonitrile	HAN			**		
Chloral hydrate	CH	0.010		**		
Formaldehyde		0.900			0.500	
Chlorite		0.200	1.000	**		
Cyanogen chloride		0.070		**		
Bromate			0.010	0.010***		
2-chlorophenol					0.300	
2,4-dichlorophenol					0.200	
2,4,6-trichlorophenol					0.020	
*Maximum contaminant level goals (MCLG); **Under consideration; ***Interim maximum acceptable concentration (IMAC)						

La rapidez de formación de THMs y la concentración final de estos dependerá de seis factores según Garrido Hoyos (2003):

1. *Temperatura* (al aumentar la temperatura mayor es la posibilidad de formación de cloroformo),
2. *Efecto del pH* (la formación de los THMs es mayor al aumentar el valor del pH del agua, por la acción catalítica del haloformo),
3. *Cloro residual* (el cloroformo

aumenta de forma directa con el residual del cloro), 4. *Precursores orgánicos o sustancias húmicas* (gran cantidad de derivados del humus mayor será la posibilidad de formación de Trihalometanos), 5. *Concentración de bromo (Br) en el agua* (el bromo reacciona con el cloro para formar ácido hipobromoso y a su vez éste con precursores orgánicos) y 6. *Tiempo de contacto del cloro*.

#### *Clorofenoles*

Estos compuestos se forman debido a la reacción del fenol con el cloro, en el agua se pueden llegar a encontrar en concentraciones pequeñas por debajo de 0.001 mg/L, su presencia en otorga un sabor desagradable al agua de consumo.

Los clorofenoles comunes o probables que se pueden llegar a formar durante la cloración son el 2-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2, 4,6-triclorofenol, éste último se considera cancerígeno en animales.

La EPA recomienda que el agua potable no contenga más de 0.04 mg/L de 2-clorofenol para adultos expuestos de por vida, y 0.05 mg/L para exposiciones de 1 a 10 días o más en niños. Para el 2,4-diclorofenol, la EPA recomienda que el agua potable no contenga más de 0.03 mg/L para exposiciones de 1 a 10 días o más en niños (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999).

#### *Ácidos acéticos halogenados (HAA)*

Estos subproductos son los más abundantes después de los THMs, se forman por la presencia de materia orgánica en el agua al momento de pasar por el proceso de cloración, su concentración depende del pH, mientras éste sea menor, la concentración de HAAs será mayor, los más abundantes son aquellos que poseen 2 átomos de cloro y/o 2 bromos. En los suministros de agua potable los niveles típicos de estos compuestos va desde los 0.03 a los 0.15 mg/L (Olomedo Sánchez, 2008).

#### *Cloramias y sus derivados*

Las cloramias son formadas por la reacción del cloro con el amonio o aminas orgánicas. Se pueden formar monocloramias, dicloroamias y tricloroamias. Sin embargo, las dicloroamias y, principalmente, las tricloroamias son compuestos olorosos y, por lo tanto, su formación en el agua potable no es deseada (Barrenechea Martel & Cánepa de Vargas, Capítulo 10: Desinfección, 2004).

#### *Acetronitrilos halogenados*

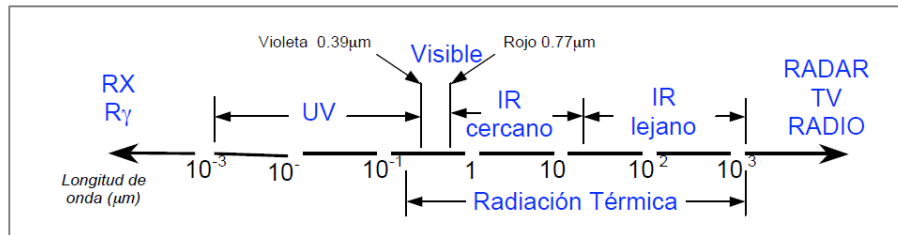
Se han detectado como subproducto de la cloración de aguas superficiales y subterráneas. Los precursores potenciales para la formación de estos compuestos son las algas, las

sustancias húmicas y material proteínico, los cuales están presentes de forma natural en el agua. El más abundante de los acetronitilos es el dicloroacetronitilo. En varios estudios se encontró éste compuesto en los suministros de agua muy clorada, a concentraciones hasta de 0.02 mg/L

## 2.7 ENERGÍA SOLAR

La energía solar mantiene a la gran mayoría de los organismos vivos conocidos, proveyendo todo el calor y la luz que nuestro planeta recibe. El sol es una estrella, la más cercana al planeta Tierra; su edad se estima en unos 5,000 millones de años.

La radiación emitida por el Sol comprende una gama continua y muy extensa de longitudes de onda que van desde los rayos gamma ( $\gamma$ ) a las ondas de radio, pasando por los rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarroja (IR) y microondas (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), 2009).



**Figura 2.14:** Espectro de radiación electromagnética (INTA, 2009)

Esta radiación solar llega a la superficie de la Tierra, está atenuada en su intensidad por diversos procesos, como son:

1. Absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua.
2. Dispersión molecular (o de Rayleigh) por los mismos componentes.
3. Dispersión por aerosoles (o de Mie) y absorción por los mismos

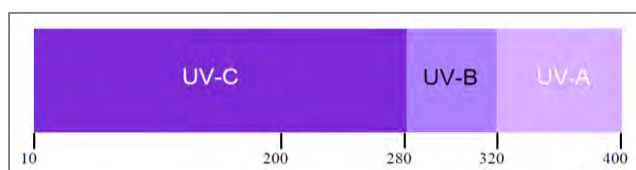
Estos tres procesos modifican las características de la radiación incidente: una parte de la misma, procedente del sol y la zona circunsolar, mantiene la dirección y se conoce como *radiación directa*; la dispersada por el aire y las nubes pierde la dirección definida y llega al suelo desde todo el hemisferio superior y se le conoce como *radiación difusa*. Si se agrega a esta última la dispersada por la superficie terrestre y la directa se obtiene el parámetro de interés energético que se mide sobre un plano: la *radiación global*, también conocida como radiación total o hemisférica (Grossi Gallegos, 2005).

La radiación que influye directamente con el desarrollo de la vida en el planeta (plantas, animales, microorganismos, etc.) es el espectro UV y se encuentra situado entre los rayos X y la luz visible.

La porción ultravioleta del espectro solar es habitual y arbitrariamente dividida en tres categorías, que difieren en su capacidad de interactuar con la materia, tanto con las



moléculas de la atmósfera, como la biota de la superficie (Blesa, Navntoft, & Dawidowski, 2005). (Figura 2.15)



**Figura 2.15:** Región ultravioleta del espectro electromagnético (INTA, 2009)

- **UV-A:** las longitudes ondas en el rango 315-400 nm, llamado “luz negra” es el menos dañino para los seres humanos y es muy utilizado por su capacidad de hacer materiales fluorescentes emitan radiación electromagnética en la región del visible. También se utiliza en máquinas bronceadoras y de fototerapia.
- **UV-B:** longitudes de onda entre 280-315 nm, tiene energía suficiente para destruir capas biológicas. Gran parte del UV-B solar es filtrado por la atmósfera. Sin embargo, la filtración no es total, y la fracción que llega a la superficie resulta ser la más dañina para los seres vivos.
- **UV-C:** longitudes de onda entre 100-280 nm. Cuando los fotones de esta región colisionan con los átomos de oxígeno, la energía de intercambio causa la formación de ozono, por lo que el UV-C solar es absorbido por unos cientos de metros de la capa atmosférica. Las lámparas de ozono artificiales son utilizados como purificadores de aire y agua debido a su habilidad para matar bacterias (Bohórquez Ballén & Pérez Mogollón, 2007).

Actualmente el empleo de la luz UV en el proceso de desinfección está ganando popularidad debido a su alta eficiencia para eliminar microorganismos y por no producir subproductos que pueden afectar la salud del ser humano, el mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de radiación ultravioleta inciden sobre el material genético de los microorganismos y los virus, y los destruyen en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua. Diversas investigaciones han arrojado que la dosis de radiación UV suficiente para matar a la *Escherichia coli* es de  $6.600 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

## 2.8 COLECTORES SOLARES

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta al colector, proviene básicamente del espectro visible del espectro solar (longitudes de onda entre 300 y 3000 nm) y es por naturaleza variable con el tiempo (Salguero Fernández, 2008)

En función de la temperatura que puede alcanzar el fluido, lo podemos dividir en dos grandes grupos:

- *Los de concentración:* son aquellos que necesitan enfocar la energía dispersa para llegar a temperaturas superiores a los 100-150 °C (Castillos, 2007).
- *Los colectores planos:* son dispositivos más simples que nos permiten obtener energía calórica de baja temperatura, inferior a 100 °C (Castillos, 2007).

### **Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) modificado**

Como se ha descrito anteriormente la energía solar se puede utilizar como desinfectante de aguas contaminadas junto con procesos de fotocátalisis con  $\text{TiO}_2$  o Foto-Fenton, entre otros. La porción del espectro solar total que se utiliza en estos procesos es pequeña, y por lo tanto existe un gran incentivo para utilizar la mejor óptica posible para obtener la recolección de la radiación solar (Collares-Pereira, 2005).

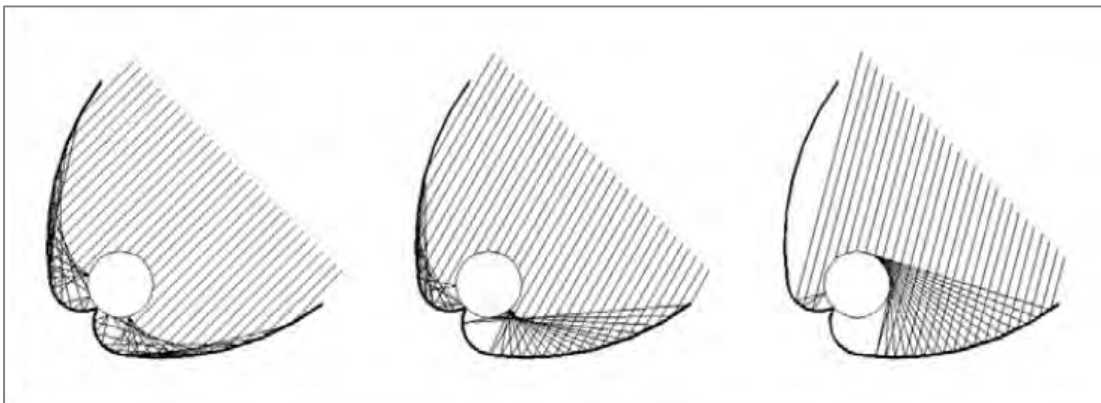
La energía solar está ampliamente disponible para utilizarse en aplicaciones térmicas y para la producción directa de electricidad. En el primer caso, se han desarrollado colectores de energía solar que funcionan desde temperaturas muy bajas hasta temperaturas muy altas, siempre teniendo en cuenta la importancia de reducir las pérdidas de calor para asegurar una alta eficiencia. En el segundo caso, ha habido preocupación acerca de la reducción del costo de las células semiconductoras. En ambos casos, una posibilidad para lograr esos objetivos es el uso de la concentración, es decir, la reducción del área de absorción con respecto al área de recolección, ya que estas pérdidas de calor y los costos son proporcionales a la primera y no a la segunda (Collares-Pereira, 2005).

La óptica convencional de enfoque, logra fácilmente la reducción de costos mediante el uso de lentes o espejos parabólicos. Sin embargo, la concentración lograda está muy lejos del límite establecido por la segunda ley de la termodinámica o por los principios de conservación del espacio. Esto significa que es posible lograr un mejor desempeño con otro tipo de sistema óptico. Estos sistemas se conocen como concentradores sin imágenes,

concentradores de tipo CPC, concentradores de tipo Ideal o Winston y pertenecen a una nueva rama de la óptica llamada Óptica sin Imágenes (Collares-Pereira, 2005).

La idea del CPC tiene un poco más de 45 años, fue concebido simultáneamente en 1966 en Estados Unidos por Hinterberg y Winston, en Alemania en 1966 por Ploke, y en la URSS por Baranov y Melnikov. En 1974 Winston describió el CPC en 2D, mostrando las ventajas de este tipo de concentrador, como un concentrador de no imagen, para ser usado en dispositivos solares, y también demostró que el CPC tiene la máxima concentración posible (Tapia S. & Del Río P., 2009).

Los CPCs son captadores estáticos con una superficie reflectante que sigue una involuta alrededor de un reactor cilíndrico (figura 2.16) y consiguen concentrar sobre el receptor toda aquella radiación que llega dentro del denominado “ángulo de aceptación” del captador (Gálvez, 2005).

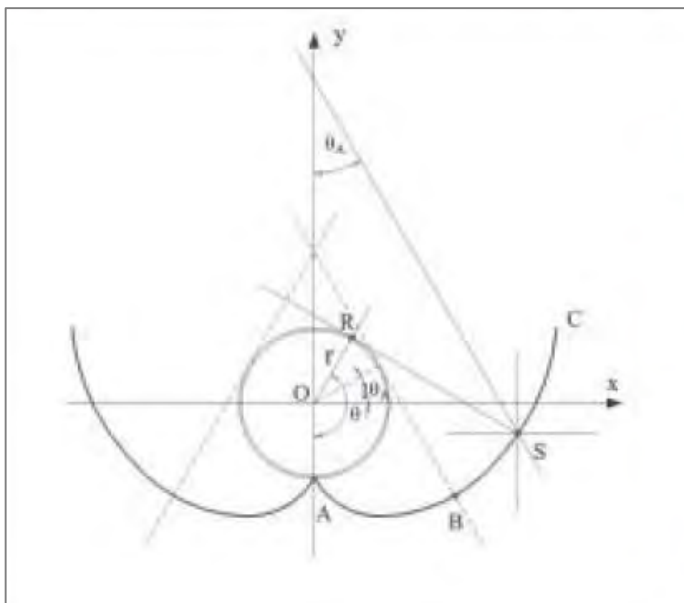


**Figura 2.16:** Reflexión sobre un reactor CPC: toda la luz que llega a la apertura del captador será reflejada alrededor del reactor si el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de aceptación del CPC (Gálvez, 2005).

Uno de los puntos más interesantes de este dispositivo de concentración es que, mientras un concentrador parabólico concentra los rayos de tal forma que la información es preservada formando imágenes, la concentración de una CPC no preserva la información, es decir, rayos que entran a una vecindad no llegan en la misma vecindad a la región de concentración, y por lo tanto no forman una imagen a la salida del CPC (Tapia S. & Del Río P., 2009).

En la figura 2.17 explica para un reflector CPC con un reactor tubular, en donde el punto reflector genérico  $S$  puede describirse en términos de dos parámetros: el ángulo  $\theta$ ,

comprendido entre los segmentos  $OA$  y  $OR$  ( $O$  es el centro del tubo receptor), y la distancia  $\rho$ , que viene dada por el segmento  $RS$  (tangente al tubo receptor) (Gálvez, 2005).



**Figura 2.17:** Curva de captación de un CPC.

Los dispositivos CPC para aplicaciones fotoquímicas están generalmente fabricados con reflectores de aluminio y la estructura suele estar constituida por un simple marco que, a su vez, sirve de soporte para interconectar los tubos de vidrio que componen el fotoreactor. Estos sistemas presentan la ventaja de tener un área de reactor sustancialmente menor, lo que puede significar un volumen más reducido de reactor, un circuito menor y una mayor facilidad para confinar, controlar y manipular el fluido que se pretende tratar (Gálvez, 2005).

## 2.9 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, el desarrollo de nuevas tecnologías de purificación. En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar (Litter, 2005).

Los métodos basados en la oxidación química o fotoquímica de los contaminantes constituyen un grupo de nuevas tecnologías denominadas genéricamente **Procesos de Oxidación Avanzada (POAs)** (Pey Clemente, 2008).

Los POAs son procesos químicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, implican la formación de especies químicas llamadas radicales hidroxilos ( $OH$ ) que tienen un alto potencial de oxidación y son capaces de realizar un ataque poco selectivo (debido a su electrón desapareado) hacia compuestos orgánicos e inorgánicos produciendo, en ocasiones, una mineralización u oxidación de los compuestos más recalcitrantes, hasta convertirlos muchas veces a  $CO_2$  y agua. En el caso de los microorganismos, estos radicales  $\cdot OH$  Atacan la doble capa bilipídica que conforma la pared externa de la célula, generando reacciones de peroxidación lipídica que son letales para ellos (Canche Uuh, 2007).

En la mayoría de los POA, a partir de diferentes combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno, radiaciones UV, dióxido de titanio o mediante el reactivo Fenton ( $H_2O_2/Fe^{2+}$ ), se producen radicales  $\cdot OH$ , quienes son los responsables, como se mencionó con anterioridad, de la oxidación de los compuestos orgánicos por captura de hidrógeno y la formación de un radical orgánico, que puede reaccionar con el oxígeno atmosférico formando peroxirradicales que dan lugar a una serie de reacciones de degradación oxidativa, alcanzando en algunos casos la mineralización completa de la materia orgánica (Pey Clemente, 2008).

La fotocatalisis es una tecnología que podría aportar soluciones innovadoras para la desinfección del agua. Así, por ejemplo, la aplicación de un sistema fotocatalítico después de un tratamiento físico como la filtración, representa un acople con gran potencial para eliminar tanto los microorganismos como la materia orgánica presentes. La degradación de de una parte de la materia orgánica por fotocatalisis limitará la formación de THMs, en el caso de aplicar la cloración después del proceso fotocatalítico, para mantener la calidad del agua durante su almacenamiento (Rincón, Giraldo, & Pulgarín, 2005).

Los POAs, suelen clasificarse en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos (tabla 2.13). Los procesos foto-oxidativos ayudados por luz pueden dividirse en dos grupos homogéneos y

heterogéneos. Los procesos homogéneos incluyen aquellos que usan  $H_2O_2$  u  $O_3$  para generar radicales  $\cdot OH$  y los que se usan como mediadores de hierro. Los compuestos heterogéneos están constituidos casi completamente por los procesos fotocatalíticos mediados por  $TiO_2$  (semiconductor), y la foto-oxidación por compuestos férricos (Canche Uuh, 2007).

**Tabla 2.13:** Procesos de Oxidación Avanzada (Litter, 2005)

Procesos No Fotoquímicos	Procesos Fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ( $O_3/OH^-$ )	Radiólisis
Ozono con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ )	Procesos fotoquímicos
Proceso Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ )	Fotólisis de agua en el ultravioleta de vacío UV/ $H_2O_2$
Oxidación electroquímica	UV/peróxido de hidrógeno
y procesos con haces de electrónicos	UV/ $O_3$
Plasma no térmico	Foto-Fenton
Descarga Electrohidráulica-ultrasonido	Foto-Fenton y relacionados
Oxidación en agua sub/supercrítica	Fotocatálisis heterogénea

En particular, dos POAs han demostrado recientemente su habilidad en la desinfección de microorganismos: la fotocatalisis heterogénea y homogénea. El término fotocatalisis se define como la aceleración de una fotorreacción producida por un catalizador. Con el fin de tomar lugar, **la fotocatalisis heterogénea** requiere que el catalizador absorba energía y que la especie absorbente genera portadores de carga (huecos y electrones) y que éstos últimos son transferidos al oxidante. Al mismo tiempo, el catalizador acepta electrones del agente reductor los cuales llenan los huecos generados en la banda de valencia del semiconductor. De esta forma, el flujo neto de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado. El concepto general de la degradación fotocatalítica heterogénea es simple: el uso de un semiconductor para generar suspensiones coloidales estables bajo la radiación para estimular una reacción en la interface sólido-líquido (o sólido-gas).

El proceso de fotocatalisis heterogénea usando dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) como catalizador ha sido ampliamente utilizado para la desactivación de una amplia variedad de microorganismos así como la eliminación de células cancerosas (Bandala, Corona-Vásquez, Guisar, & Uscanga, 2007).

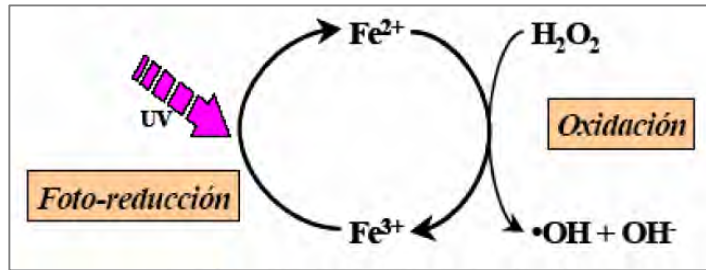
La **fotocatálisis homogénea** se refiere a procesos fotocatalíticos en los cuales el catalizador está disuelto en agua durante el proceso de óxido-reducción. Como ocurre en la fotocatalisis heterogénea, los procesos homogéneos están basados en la generación de radicales hidroxilo, sin embargo, a diferencia de aquellos, se ha propuesto que algunas otras especies altamente oxidantes pueden ser también responsables de la remoción de los contaminantes. El proceso Fenton ( $\text{Fe (II)} + \text{H}_2\text{O}_2$ ) y el proceso Fenton promovido por energía lumínica (Foto-Fenton,  $\text{Fe (II)} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{radiación}$ ) son las metodologías de fotocatalisis homogénea más estudiadas en la actualidad. A diferencia de la ampliamente estudiada desactivación de microorganismos mediante fotocatalisis heterogénea, la aplicación de fotocatalisis homogénea en la desactivación de microorganismos en agua no ha sido suficientemente explorada y sólo se encuentran algunos reportes recientes de su uso (Bandala, Corona-Vásquez, Guisar, & Uscanga, 2007).

### 2.9.1 Foto-Fenton

H. J. H. Fenton descubrió en 1894 que varios metales, entre ellos las sales de hierro, tenían la capacidad de mejorar la eficacia del oxidante peróxido de hidrógeno. A partir de este descubrimiento, al peróxido de hidrógeno catalizado con hierro se le conoce de forma general como proceso Fenton. En la oxidación de compuestos orgánicos mediante procesos Fenton se mantienen en disolución el efluente residual y los reactivos ( $\text{H}_2\text{O}_2$  y sales de hierro) durante un tiempo determinado para completar la reacción, que se lleva a cabo normalmente en medio ácido (para evitar la precipitación del hidróxido férrico). A continuación, se neutraliza el agua hasta pH alcalino. Así, precipitan las sales metálicas de hierro que posteriormente se separan por decantación (Forteza Gorraiz, 2010).

La reacción Fenton es conocida por su acción en la generación in situ de radicales  $\cdot\text{OH}$ , los cuales oxidan los contaminantes orgánicos. Sin embargo, la eficiencia de la reacción es baja. Un proceso mucho más eficiente consiste en generar radicales libres  $\cdot\text{OH}$  por absorción de radiación solar de una solución de sales férricas y peróxido de hidrógeno a esto se le conoce como reacción **Foto-Fenton**. Ciertos complejos de hierro se han usado en el sistema Foto-Fenton, ya que absorben la radiación hasta una longitud de onda de 500 nm.

En consecuencia, la utilización de estos complejos tiene la ventaja de aprovechar tanto la radiación solar ultravioleta como parte de la visible para la destrucción de los contaminantes. Se ha demostrado que la reacción Foto-Fenton puede acelerar la destrucción de herbicidas, fenoles y muchos otros contaminantes aromáticos y alifáticos halogenados (Sarria, Parra, Rincón, Torres, & Pulgarín, 2005). En 1990, Faust y Hoigné propusieron el siguiente mecanismo de reacción:



**Figura 2.18:** Mecanismo de reacción Foto-Fenton (Fortea Gorraiz, 2010)

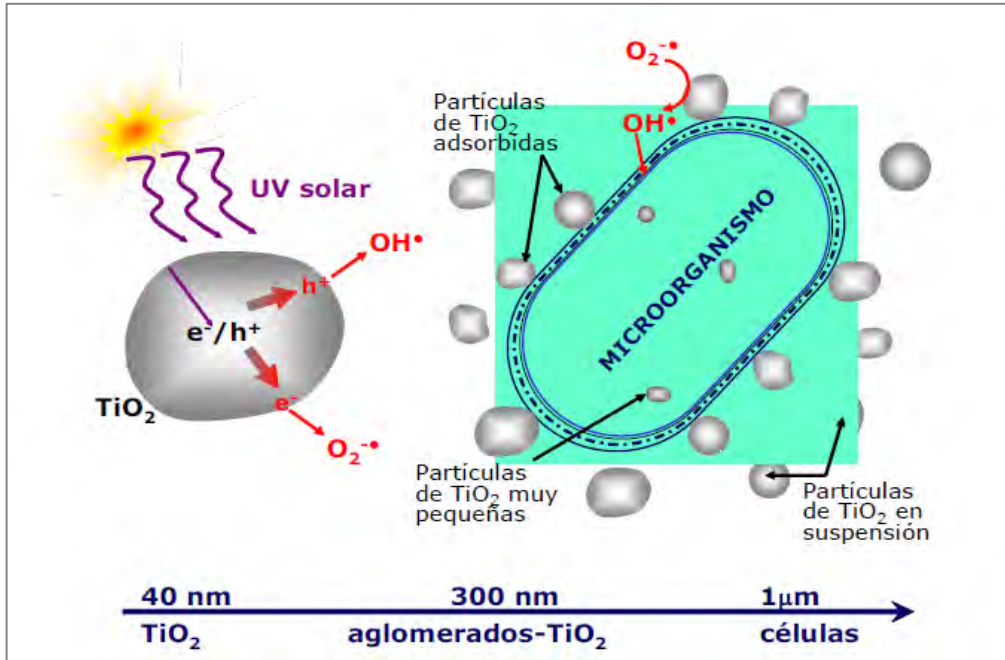
Según esta reacción, continúa produciéndose la oxidación del ion ferroso por la acción del oxidante del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , mientras que gracias a la foto-reducción, el ion férrico acumulado se reduce a ion ferroso. Así el ion ferroso regenerado vuelve a reaccionar con el peróxido generando radicales hidroxilo en un ciclo continuo (Fortea Gorraiz, 2010).

Los compuestos de hierro se suministran como  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  y complejos de Fe (III), tales como el ferroxilato ( $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ ) y otros carboxilatos de hierro. La utilización de ferroxilato conlleva un significativo ahorro energético. El diseño de los reactores y su operación son sencillos, su costo es reducido y no existen limitaciones de transferencia de masa, por tratarse de un sistema homogéneo. Los reactivos son accesibles y, para volúmenes de agua a tratar no muy elevados, resultan baratos. Estos sistemas, permiten, además usar la radiación solar ultravioleta difusa. Sin embargo, una de sus desventajas es que, tras el tratamiento, las sales de hierro han de eliminarse por neutralización y precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Pérez Martínez, Cuesta Santianes, & Cabrera, 2009).

La desinfección mediante el proceso Foto-Fenton no ha sido explorada muy a fondo, sin embargo, trabajos recientes han arrojado resultados muy prometedores sobre la alta eficiencia para la eliminación de la *Escherichia coli*, esto debida a su afinidad al hierro, lo que le da una ventaja sobre otros procesos fotocatalíticos incluyendo los procesos heterogéneos.

Con el presente trabajo se pretende demostrar la ventaja y gran eficiencia que adquiere este proceso para la desinfección óptima del agua en ésta zona con alta radiación solar. La figura 2.19 ilustra la forma de actuar del  $\text{TiO}_2$  en un proceso de desinfección, el cual es muy similar al del reactivo Foto-Fenton.





**Figura 2.19:** Diagrama del proceso de fotocatalisis con microorganismos  
(Fernández I.P., 2010)



**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA**

### 3.1 METODOLOGÍA ANALÍTICA

#### 3.1.1 Diseño del experimento

Con base al segundo objetivo particular del trabajo “Determinar el peso óptimo del alambre recocido como fuente de Fe (III) y de la dosis ideal de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la muestra fortificada empleando un CPC modificado”, se procedió a diseñar la combinación de las variables para la preparación del proceso Foto - Fenton las cuales se muestran la tabla 3.1:

**Tabla 3.1:** Variables del experimento

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Molaridad)	Fe (III) (gramos)	Tiempo (Horas)	pH
<b>0.001</b>	2.5	2	6-7
<b>0.01</b>	5	2	6-7
<b>0.1</b>	7.5	2	6-7
<b>1</b>	10	2	6-7

#### *Medición de Fe (III)*

La fuente de Fe (III) se obtuvo a partir de un alambre de hierro gris conocido comercialmente como “alambre recocido” (figura 3.1), el cual es un tipo de hilo delgado que se obtiene por estiramiento de diferentes metales como hierro, cobre, latón, plata, aluminio, entre otros. Generalmente, este tipo de alambre se emplea en la industria de la construcción por su maleabilidad y fortaleza. Al estar compuesto por hierro resultó ser una fuente importante de éste por lo que se optó por trabajar con él.



**Figura 3.1:** Alambre recocido utilizado en el trabajo.

El alambre recocido se fraccionó y se pesó en una balanza analítica de acuerdo a lo estimado en la tabla 3.1. La medición se realizó en el laboratorio de Química Ambiental de la Universidad de Quintana Roo, como se muestra en la siguiente figura 3.2.



**Figura 3.2:** Pesaje del alambre recocido

Después de cada medición los fragmentos de alambre fueron almacenados en diferentes vasos de precipitado de 50 ml en reserva hasta su empleo como lo muestra la figura 3.3



**Figura 3.3:** Alambre recocido en los vasos de precipitado

#### *Medición de $H_2O_2$*

De acuerdo a las diferentes concentraciones molares establecidas en la tabla 3.1, para estimar el volumen necesario (ml) de peróxido de hidrógeno a utilizar, se empleó la fórmula de molaridad.

$$M = \frac{\text{Moles de soluto}}{\text{volumen de solución (l)}} = \frac{n}{v} \quad \text{ecuación 3.1}$$

Donde n son los gramos de soluto sobre el peso molar

$$n = \frac{\text{gr de soluto}}{\text{Peso Molar}} \quad \text{ecuación 3.2}$$

- Cálculo de volumen necesario de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 0.001 M

De la ecuación 3.1 se despejaron los moles de soluto

$$n = Mv \quad \text{ecuación 3.3}$$

Al sustituir los valores en la ecuación 3.3 se encontraron los moles de soluto necesarios para la concentración molar.

$$n = (0.001)(1) = \mathbf{0.001 \text{ moles}}$$

Los gramos de soluto resultaron del despeje de la ecuación 3.2

$$\text{gr de soluto} = (n)(\text{Peso Molar}) \quad \text{ecuación 3.4}$$

$$\text{gr de soluto} = (0.001 \text{ moles}) \left( \frac{34 \text{ gr}}{\text{mol}} \right) = 0.034 \text{ gr}$$

El peróxido de hidrógeno utilizado fue al 30% por lo que se realizó el ajuste al 100% mediante una regla de tres donde:

$$\begin{array}{l} 0.034 \rightarrow 30\% \\ \times \rightarrow 100\% \end{array}$$

$$x = \frac{(0.034 \text{ gr})(100\%)}{30\%} = 0.1133 \text{ gr}$$

Por lo tanto el ajuste al 100% del peróxido de hidrógeno fue de **0.1133 gr**.

Para calcular del volumen necesario de peróxido de hidrógeno con una concentración de 0.001M, se consideró la densidad del líquido y de la fórmula de densidad se despejó el volumen.

$$\text{densidad } (\rho) = \frac{\text{masa } (m)}{\text{volumen } (v)} \quad \text{ecuación 3.5}$$

$$\text{volumen } (v) = \frac{\text{masa } (m)}{\text{densidad } (\rho)} \quad \text{ecuación 3.6}$$

De acuerdo a la ficha de seguridad del peróxido de hidrógeno, éste tiene una densidad de 1.11 gr/ml,

$$v = \frac{0.1133 \text{ gr}}{1.11 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} = 0.1020 \text{ ml}$$

Por lo tanto el volumen que fue necesario para obtener una concentración de 0.001M de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fue de **0.1020 ml**.

Se siguió el mismo procedimiento para el cálculo del resto de las concentraciones, los cuales se muestran a continuación:

- Cálculo de volumen necesario de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 0.01M

$$n = (0.01)(1) = 0.01 \text{ moles}$$

$$\text{gr de soluto} = (0.01 \text{ moles}) \left( 34 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \right)$$

$$\text{gr de soluto} = 0.34 \text{ gr}$$

Ajuste del porcentaje:

$$x = \frac{(0.34 \text{ gr})(100\%)}{30\%} = 1.1333 \text{ gr}$$

Volumen:

$$v = \frac{1.1333 \text{ gr}}{1.11 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} = 1.020 \text{ ml}$$

- Cálculo de volumen necesario de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 0.1M

$$n = (0.1)(1) = 0.1 \text{ moles}$$

$$\text{gr de soluto} = (0.1 \text{ moles}) \left( 34 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \right)$$

$$\text{gr de soluto} = 3.4 \text{ gr}$$

Ajuste del porcentaje:

$$x = \frac{(3.4 \text{ gr})(100\%)}{30\%} = 11.3333 \text{ gr}$$

Volumen:

$$v = \frac{11.3333 \text{ gr}}{1.11 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} = 10.2101 \text{ ml}$$

- Cálculo de volumen necesario de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 1M

$$n = (1)(1) = 1 \text{ moles}$$

$$\text{gr de soluto} = (1 \text{ moles}) \left( 34 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \right)$$

$$\text{gr de soluto} = 34 \text{ gr}$$

Ajuste del porcentaje

$$x = \frac{(34 \text{ gr} * l)(100\%)}{30\%} = 113.3333 \frac{\text{gr}}{l}$$

Volumen:

$$v = \frac{113.3333 \text{ gr}}{1.11 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} = 102.102 \text{ ml}$$

La tabla 3.2 resume los valores calculados de acuerdo a la concentración molar del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

**Tabla 3.2:** Valores volumétricos del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Concentración molar de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Volumen necesario
0.001M	0.1020 ml
0.01M	1.020 ml
0.1M	10.210 ml
1M	102.102 ml

### 3.1.2 Verificación de la micropipeta

Para poder obtener medidas volumétricas precisas se utilizó una micropipeta para medir el volumen más pequeño de peróxido de hidrógeno, a dicho instrumento se le realizó una verificación en el Laboratorio de Estatal de Salud Pública del Estado (LESPQROO), esto

con el fin de darle certeza y confiabilidad a la medición. La verificación se realizó de acuerdo a los puntos siguientes:

1. Se dejó el instrumento fuera de la caja por 24hrs, con el propósito de adaptarse a las condiciones ambientales del momento.
2. En un vaso de precipitado se colocó agua destilada, de la cual se tomaron diferentes volúmenes a verificar.
3. Dentro de la balanza analítica se colocó un segundo vaso de precipitado en el cual se colocó el volumen tomado con la micropipeta y tomando lectura del peso para cada volumen.
4. Se ajustó la micropipeta a 100 y 200  $\mu\text{l}$  y se realizaron 10 mediciones para cada uno, utilizando una punta diferente para cada medición.

Al terminar la verificación se concluyó que la micropipeta era apta y precisa al coincidir el volumen medido con el peso dado por la balanza analítica, por lo que se procedió a empacarla y trasladarla al lugar donde fue utilizada.

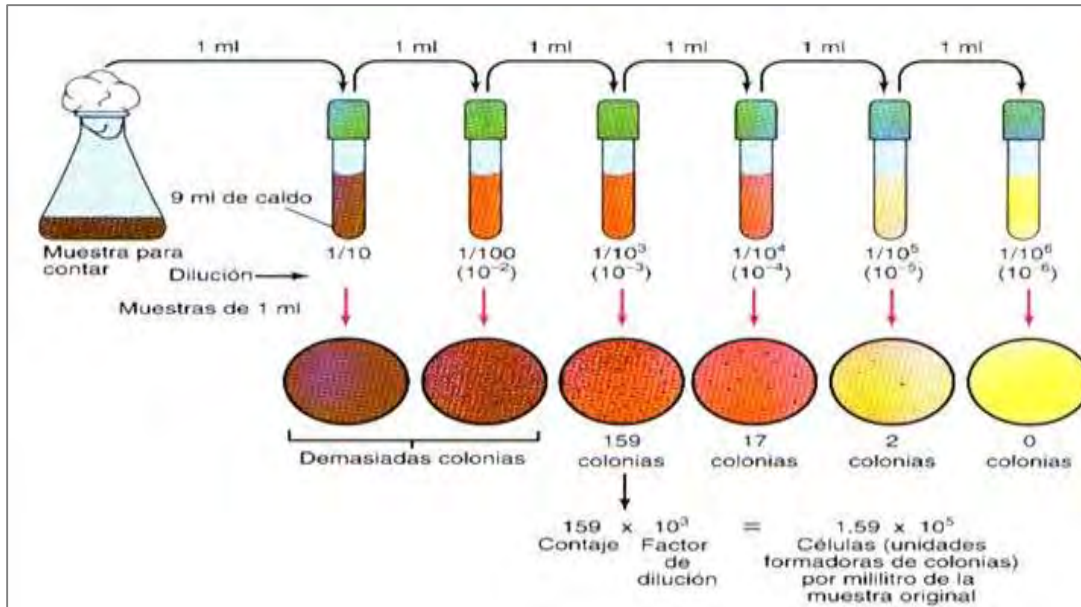
### **3.1.3 Preparación de las muestras fortificadas**

Para la realización del trabajo de investigación fue de suma importancia conocer la concentración microbiológica inicial de la muestra de agua, por lo se optó trabajar con muestras fortificadas en donde se conoce la concentración aproximada de colonias bacterianas. Considerando las tres fases por las que pasa la bacteria a lo largo de su vida (fase de crecimiento, estacionaria y decaimiento) se considera que la fase óptima para trabajar es la estacionaria, pues la concentración es más estable. Para obtener el cultivo de *E. coli* en esta fase, se utilizó una metodología específica, en base a los parámetros del LESPQROO, cuya metodología se describe a continuación.

1. Se incubó en 50 ml de caldo BHI (cerebro-corazón) una azada de la sepa *Escherichia coli* ATCC 11229 (NOM-244-SSA1-2008), a una temperatura de 35 a 37 °C durante 24 hrs.
2. Durante el tiempo de incubación se realizaron diluciones cada hora de  $10^{-1}$  a  $10^{-9}$ , tomando 1 ml de la muestra antes preparada (muestra para contar) y agregándole 9 ml de agua peptonada (solución buffer o solución salina al 85%), siendo ésta la dilución de  $10^{-1}$ , posteriormente se tomó 1 ml de esta disolución agregándolo a otro tubo de ensayo y se agregó nuevamente 9 ml de agua peptonada, esta fue la disolución  $10^{-2}$ , y así sucesivamente hasta que se llegó a una disolución de  $10^{-9}$ .



3. Una vez que se realizaron las disoluciones se procedió a realizar el conteo de bacterias en placa, con el objetivo de encontrar la dilución en la cual se da la fase estacionaria, como se muestra en la figura 3.4.



**Figura 3.4:** Disoluciones para encontrar la fase estacionaria

Con base a la “Guía para la elaboración de métodos de pruebas microbiológicas” del LESPQROO, la fase estacionaria se encuentra al incubar a 35° de 22 a 24 horas, la cual se notó entre las 18 y 22 horas en el presente trabajo se trabajó con la disolución de  $10^{-6}$ , a ésta se le denominó solución madre, con la cual se realizaron las inoculaciones en el agua utilizada en el experimento.

#### *Inoculación de la muestra de agua*

Una vez localizada la fase estacionaria de la curva de crecimiento de la *E. coli*, del tubo de la disolución encontrada se tomó 1 ml y se diluyó en 1 litro de agua estéril, obteniendo una concentración aproximada de 86 UFC/100 ml.

#### **3.1.4 Construcción e Instalación del CPC modificado**

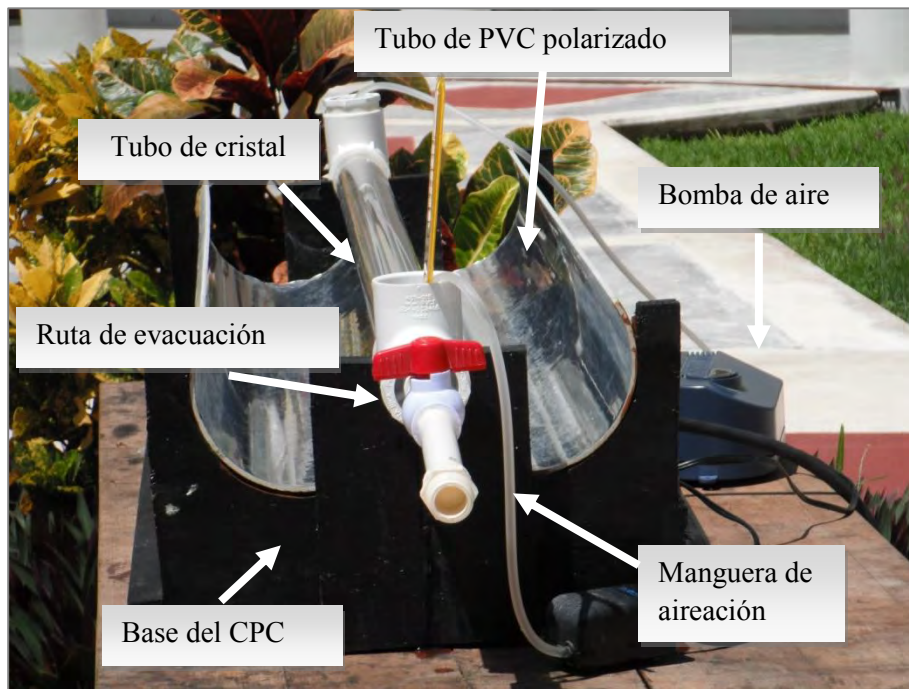
Se construyó un colector solar de PVC de 1.07 m de largo y 0.3 m de diámetro, este cilindro fue cortado por la mitad quedando dos partes semi circulares, las cuales fueron polarizadas con un material reflejante, los semi círculos fueron pegados a una base de madera pintada de negro, con el objeto de aprovechar lo más posible la radiación solar (figura 3.5).

En el centro del dispositivo se colocó un tubo cortado proveniente de tubos evacuados de 1.20 m de largo y 0.065 m de diámetro, con capacidad de 1 L, a dicho tubo se le hicieron adecuaciones diferentes en ambos extremos, al primer extremo del tubo se le colocó un “codo” de PVC para sellar y evitar que se derrame el líquido, así mismo a este “codo” se le dejó un orificio por donde se introdujo la manguera de aireación. En el segundo extremo se colocó una “T” de PVC (figura 3.5), la cual tuvo funciones indispensables para el proceso en cada uno de sus tres extremos, el primero permitió el paso de la manguera para la aireación, el segundo fue pegado al tubo y el tercer extremo sirvió como ruta de evacuación del líquido, a dicho extremo se le colocó una reducción donde se le instaló una llave de paso a la cual se le adecuó un filtro comercial (figura 3.6), para evitar taponamiento en la filtración por membrana debido al precipitado producto del proceso.

El CPC se colocó en el centro del edificio de la División de Ciencias e Ingeniería ubicado en la Universidad de Quintana Roo (figura 3.6).

#### *Sistema de aireación*

A través del tubo de cristal se hizo pasar una manguera (utilizadas comúnmente en la aireación de peceras) de 3m de largo a la cual se le realizaron orificios de 3cm de separación entre uno y otro, y en cada extremo de la manguera se conectó a dos bombas de aireación (figura 3.5).



**Figura 3.5:** Componentes del Colector Parabólico Solar



**Figura 3.6:** Filtro comercial adaptado al Colector Parabólico Solar



**Figura 3.7:** Colector Parabólico Solar

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las pruebas se realizaron como se describe a continuación:

1. Se colocó en la manguera de aireación, fracciones del alambre recocido, pesadas con anterioridad, las cuales se distribuyeron uniformemente a lo largo de dicha manguera, la cual fue insertada dentro del tubo de cristal que se colocó en el CPC.
2. La micropipeta utilizada para la medición de volumen del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (previamente verificada), fue expuesta a las condiciones ambientales durante 12 horas para su calibración y así evitar errores de medición, en cuanto al peróxido de hidrógeno fue depositado en una nevera con hielo para su posterior uso en campo.
3. En el LESPQROO, se inoculó en 1 L de agua estéril 1 ml de la cepa bacteriana *Escherichia coli*. Esta muestra contaminada se transportó al edificio de la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo, para la realización de las pruebas correspondientes.
4. Antes de iniciar el proceso a la muestra de agua se le tomó su temperatura y pH inicial.
5. Al frasco con el inóculo de *E. coli* se vertió el volumen correspondiente a la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con la cual se trabajó y se agitó 10 veces de forma suave para dar uniformidad al líquido.
6. Una vez agregado el primer reactivo a la muestra de agua, esta se depositó en el tubo de cristal del reactor, para dar comienzo al tratamiento.
7. Ya con la muestra en el colector, se prendió el sistema de aireación

En todo momento se vigiló la temperatura del reactor, en la base del CPC se colocaron 2 calces que dieron una inclinación de 7° hacia el sur para un mejor aprovechamiento de la radiación solar del colector.

Al concluir el tiempo de tratamiento del agua en el CPC, esta se hizo pasar a través del filtro comercial para eliminar en su mayoría los sólidos suspendidos en ella, se realizó la medición de temperatura y pH final, seguido se depositó en un frasco estéril otorgado por el LESPQROO.

El agua tratada fue transportada al LESPQROO para su análisis microbiológico con el método de filtración por membrana, el cual se encuentra descrito en el apartado 3.2.2.

#### 3.2.1 Medición de temperatura y pH

La temperatura se midió con un termómetro de mercurio cuyo rango va de -10 a 110°C. Fue colocado en el reactor para tomar y vigilar la temperatura durante todo el proceso.

El pH fue medido empleando un método cualitativo, mediante las tiras reactivas de pH. Estas tiras se impregnaron de la muestra antes y después del proceso y se compararon en la escala de colores que mide el pH.

### 3.2.2 Método de filtración por membrana

El procedimiento se realizó de acuerdo a la NOM-244-SSA1-2008 “Equipos y sustancias germicidas para tratamiento doméstico de agua. Requisitos sanitarios” en su apéndice informativo B se describe el procedimiento para la filtración por membrana.

Este método se basa en la filtración de una muestra para concentrar las células viables sobre la superficie de una membrana y transferirlas a un medio de cultivo apropiado, para posteriormente contar el número de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) desarrolladas después de la incubación.

#### *Preparación de los materiales*

Se esterilizó el área de trabajo con alcohol Benzal al 5%, así como todos los materiales utilizados.

El colector de aluminio para embudos, la probeta graduada y los embudos fueron rodeados con mecheros de bunsen para obtener un ambiente estéril, como lo muestra la figura 3.7.



**Figura 3.7:** Embudos y colector de aluminio

Se prepararon 3 placas de 47 mm de diámetro con cojín absorbente marca millipore, depositando en ellas tres diferentes medios. La primera placa contuvo el m-endo total coliform Broth utilizado para CT. En la segunda se depositó el m-coliBlue 24 broth, el cual es un medio exclusivo para *E. coli*, cuya presencia se denota por la coloración azul en las colonias. Por último, en la tercera placa, se utilizó el medio m-MUG donde la presencia de

*Escherichia coli* se nota con un brillo fluorescente al exponer la placa en una fuente de luz UV.

*Proceso de filtración*

1. Una vez preparados los materiales esterilizados a utilizar, con las pinzas estériles se colocaron las membranas de 0.45  $\mu\text{m}$  blancas cuadrículadas marca millipore, sobre el soporte para el filtrado por aspiración.
2. Se continuo con el sellado de los embudos para filtración
3. A continuación se realizaron tres aforos de 100 ml de la muestra de agua tratada y cada aforo se vertió en diferentes embudos de filtración.
4. Continuando con la metodología, se dio inicio a la filtración al encender la bomba de vacío.
5. Terminada la filtración se tomaron las membranas una por una y se colocaron en las placas preparadas con los medios de cultivo descritos anteriormente.
6. Una vez colocadas las membranas en las placas, éstas se llevaron a incubar a 35°C de 15 a 20 horas.

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La efectividad del proceso se midió de acuerdo a los resultados arrojados en la filtración por membrana, al diseñar el experimento se esperaban realizar pruebas que consistían en la combinación de las variables descritas en la metodología, y de las cuales, al comparar los resultados, se seleccionaría la dosis óptima para desinfectar el agua con Foto-Fenton. Sin embargo, al realizar la primera prueba, la cual tuvo una dosis de 2.5 gramos de Fe (III) y una concentración de 0.001M de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> expuesto durante 2 horas a la radiación solar, se encontró que la bacteria fue eliminada por completo, lo que hizo que se descartara el resultado, pues al no haber blanco para comprobar que la eliminación fuera real, esta prueba se desechó inmediatamente.

Se realizó una segunda prueba repitiendo la dosis de hierro y peróxido de hidrógeno, dejando un blanco en el laboratorio para comparar los resultados con éste, sin embargo los resultados de la primera prueba se repitieron, se eliminaron por completo las 86 UFC/100 ml de *Escherichia coli* de la muestra del agua, a diferencia de la primera, en ésta prueba se comparó con el blanco, el cual al analizarlo resultó con misma la concentración inicial de colonias, esto descartó todas las variables que posiblemente influenciaron en la primera prueba, entonces, la comparación entre el blanco y la muestra después del proceso, dio veracidad a la prueba, por lo tanto se concluyó que esa era la combinación óptima necesaria para desinfectar el agua, y por esta razón no se realizaron las pruebas con concentraciones más altas establecidas en la metodología.

Los primeros resultados obtenidos en la fase experimental le dieron un giro a la investigación completamente inesperado y se tomó la decisión de agregar el tiempo de exposición como una variable más al experimento, dejando fija la dosis encontrada del reactivo Fenton, esto con el objeto de determinar el tiempo óptimo de exposición a la radiación solar, por lo que se realizaron pruebas a 2 horas, 1 hora 30 minutos, a 1 hora y a 30 minutos de exposición al Sol, cuyos resultados se exponen en la tabla 4.1.



**Tabla 4.1:** Resultados de las pruebas experimentales

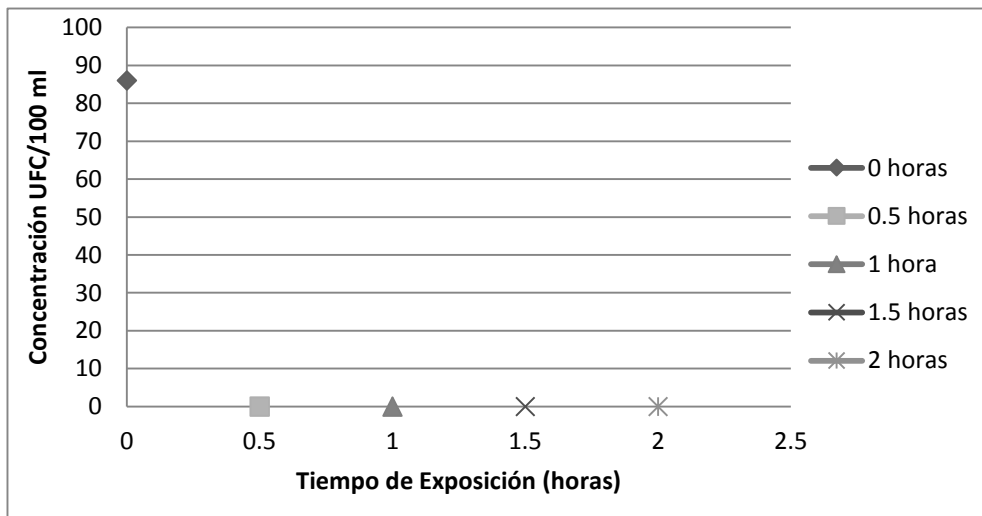
Fecha	Hora		Tiempo (hrs)	Temperatura (°C)		pH		Colonias de E. coli (UFC)		Reactivo Foto-Fenton		
	Inicial	Final		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	grs. de Fe (III)	µl de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
BLANCO			0	25	25	7	7	86	86	0	0	
a	05/09/2011	11:27	13:24	2	34	42	7	8	86	0	2.5	102
b	06/09/2011	11:30	13:00	1.5	32	40	7	7	86	0	2.5	102
c	07/09/2011	12:00	13:00	1	32	38	7	7	86	0	2.5	102
d	14/09/2011	11:10	11:40	0.5	32	40	7	7	86	0	2.5	102

Se preparó para cada una de las pruebas un blanco que dio certeza a los resultados obtenidos, pues el número de colonias tanto inicial como final fueron las mismas en todos los casos.

Se puede observar en la tabla 4.1, que durante los cuatro eventos el pH se mantuvo constante durante todo el procedimiento, demostrando que el Foto-Fenton es eficiente a un pH neutro y no a un nivel más ácido como lo señalan diversos trabajos de investigación similares. La temperatura tuvo importantes variaciones lo que indica el correcto funcionamiento del CPC modificado, cabe mencionar que durante el desarrollo de la prueba “a” en el transcurso de la segunda hora de tratamiento se nubló reduciendo la radiación solar, sin embargo no afectó en el resultado y a pesar de ello la temperatura se mantuvo constante a 42°C.

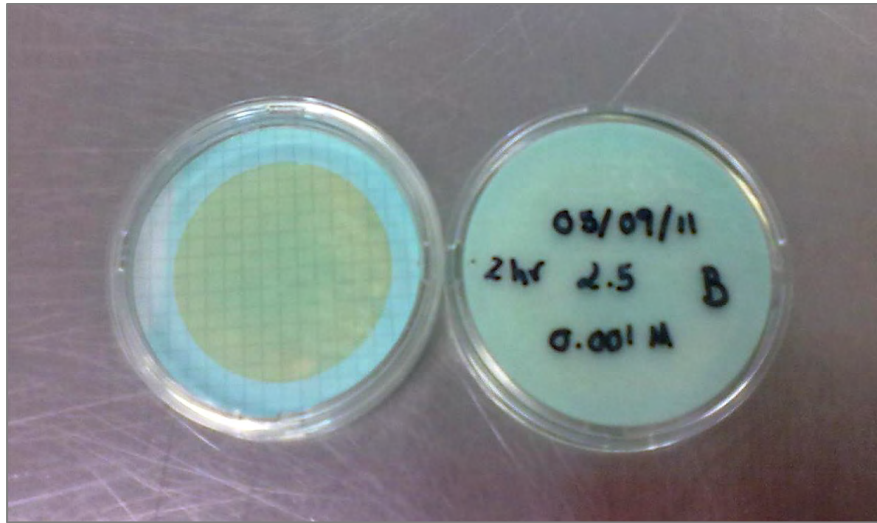
En la gráfica 4.1 se presenta la relación entre el tiempo de exposición (eje “x” o variable independiente) medido en horas, y el número de colonias encontradas después del proceso (eje “y” o variable dependiente), como se mencionó anteriormente se puede notar la disminución drástica de la población bacteriana en las muestras de agua, en los diferentes tiempos.

**Gráfica 4.1:** Comportamiento bacteriano en la desinfección

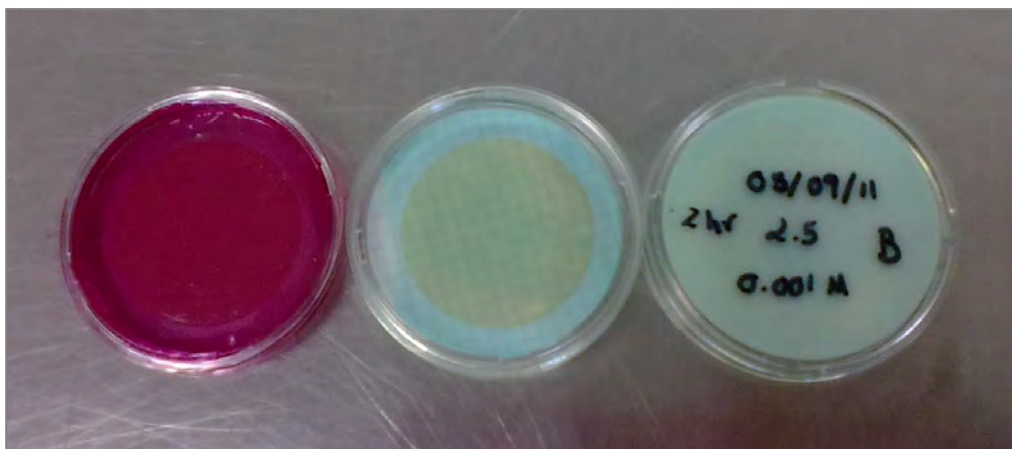


Estos resultados presentan congruencia con los encontrados por Rincón & Pulgarin (2005), donde encontraron que el tiempo óptimo para este proceso va de 60 a 30 minutos, por lo que los resultados encontrados en este trabajo están comprobando que el Foto-Fenton es un método rápido de desinfección. La gráfica se obtuvo a partir de los resultados mostrados después del proceso de filtración por membrana, donde se contabilizaron el número de colonias presentes en los diferentes medios utilizados para las pruebas.

A continuación se exponen las imágenes comparativas de los resultados de la filtración por membrana, en donde las pruebas se realizaron por triplicado.



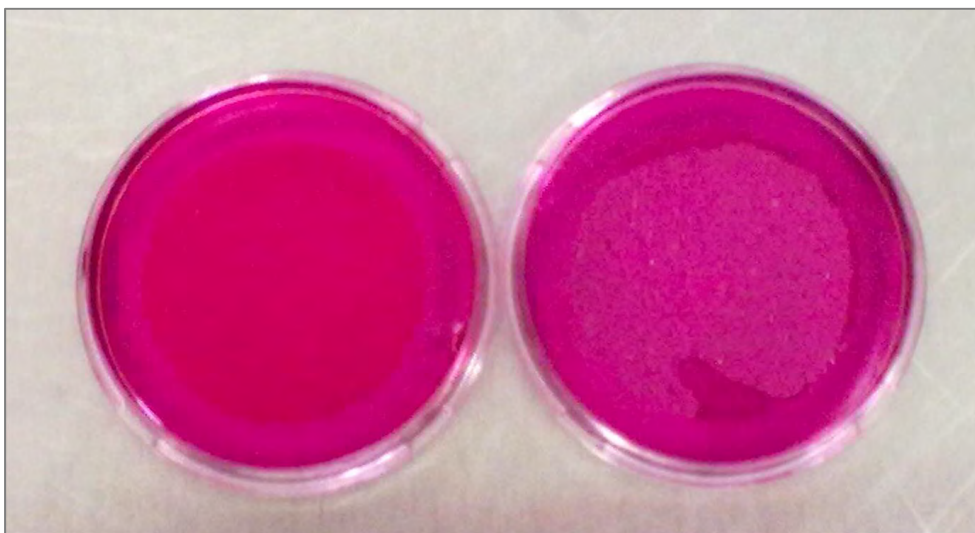
**Figura 4.1:** Resultados de la filtración por membrana de la muestra expuesta a 2 horas de radiación



**Figura 4.2:** Comparación de resultados de la filtración por membrana de la muestra expuesta a 2 horas de radiación entre los medios m-colibBlue y m-Endo

De haber resultado positiva la prueba en el medio m-Endo (imagen de la izquierda de la figura 4.2) las colonias de Coliformes fecales se denotarían de color rojo metálico y en el medio m-coliBlue las colonias de *E. coli* se tiñen de azul; sin embargo, en los resultados presentados en las figuras 4.1 y 4.2 no se presenta coloración alguna, lo que indica que el agua filtrada e incubada en estos medios presenta ausencia de Coliformes totales, fecales y colonias de *E. coli*.

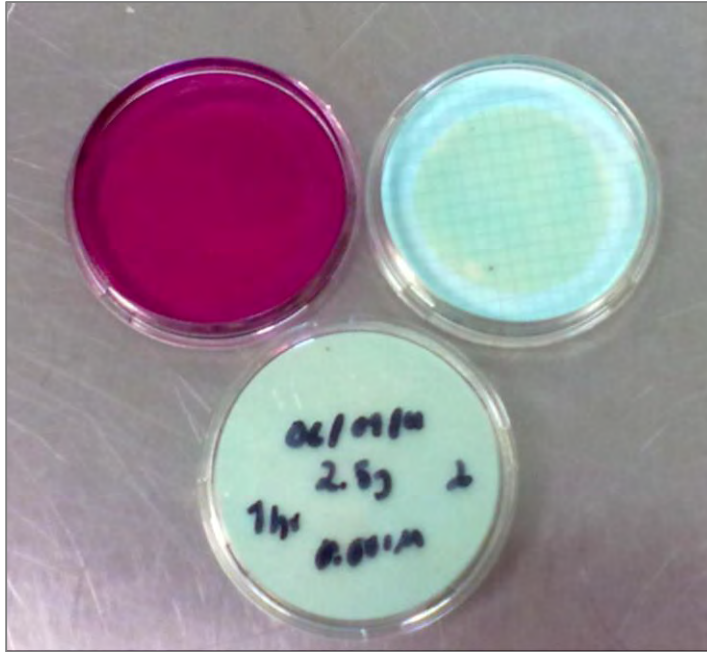
En la figura 4.3 se muestra la comparación entre el blanco y las muestras tratadas en el CPC.



**Figura 4.3:** Comparación entre el blanco (derecha) y la muestra tratada (izquierda)

La imagen de la izquierda corresponde a la muestra tratada y la de la derecha corresponde al blanco, se puede notar la diferencia de crecimiento bacteriano así como la coloración de las colonias entre una caja y otra.

En las figuras siguientes se muestran los resultados de las muestras sometidas al proceso en 1 hora y 30 minutos.



**Figura 4.4:** Resultados de las muestras sometidas a 1 hora de proceso



**Figura 4.5:** Comparativa de resultados entre el blanco (imagen superior izquierda) y la muestra tratada durante 30 minutos en el proceso (imagen superior derecha)

A lo largo del trabajo se ha resaltado la importancia del agua para uso y consumo humano, así como su influencia directa sobre la salud de los seres vivos, se ha señalado que los procesos actuales de potabilización se están quedando atrás para lograr satisfacer la demanda de agua y cumplir con los estándares de calidad cada vez más exigentes. Los procesos de oxidación avanzada se presentan como un excelente complemento al proceso convencional de potabilización, mediante la fotocatalisis homogénea y heterogénea.

La desinfección por Foto-Fenton realizado en este trabajo, ha presentado resultados prometedores, como los expuestos por Spuhler, Rengifo-Herrera, y Pulgarin (2010), donde describen que el proceso Foto-Fenton presenta un porcentaje del 200% de efectividad en la desinfección de *Escherichia coli* K12.

Como se muestra en las figuras anteriores la eficiencia del proceso a diferentes tiempos es inobjetable, de esta manera se comprueba que el Foto-Fenton es un método rápido y eficaz para la desinfección de agua, esto le abre grandes posibilidades para su aplicación bajo condiciones reales, perfilandose como un complemento exitoso en el tren de tratamiento, ayudando a disminuir las grandes dosis en la aplicación de cloro para el agua a tratar y de esta manera, disminuir o evitar los subproductos que se forman a causa de la interacción del cloro con la materia orgánica que, como se expuso en el capítulo dos, son peligrosos para el ser humano. Además, las aplicaciones del Foto-Fenton se extienden más allá del proceso de potabilización dentro de una planta de tratamiento, sus aplicaciones alcanzan a aquellas poblaciones en situación de escasez o que han sido azotados por algún fenómeno natural al ser un método rápido de desinfección de agua para uso y consumo humano.



**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos en el proceso experimental de la presente investigación, y descartando las variables que pudieron presentar interferencia, se concluye que el porcentaje de eficiencia para la desinfección de la bacteria *Escherichia coli* empleando un CPC modificado mediante el proceso Foto-Fenton y para las condiciones ambientales presentadas en la ciudad de Chetumal, es del 100% de eliminación bacteriana. El peso óptimo para alcanzar este porcentaje de desinfección del alambre recosido, en el cual está contenido el Fe (III), es de 2.5 gramos y la dosis ideal de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es de 0.001M, con un tiempo de exposición solar de 30 minutos bajo condiciones ambientales con cielo despejado.

Por lo tanto, el proceso se considera altamente eficiente debido a dos factores, primero a que el tiempo de contacto es corto y segundo a que utiliza concentraciones pequeñas del reactivo Fenton esto debido a que la bacteria tiene afinidad para absorber el hierro, lo que le da una clara ventaja frente a los demás desinfectantes, habilitando así la posibilidad para pensar en un futuro el empleo de esta tecnología como complemento en los procesos de potabilización de agua o como un nuevo proceso de tratamiento.

El trabajo aporta las dosis necesarias del Foto-Fenton para la desinfección de muestras fortificadas de agua, sin embargo, se recomienda continuar con la línea de investigación empleando dosis más reducidas así como un menor tiempo de exposición, de igual manera se recomienda realizar el proceso para muestras de agua natural aplicando la dosis encontrada en el trabajo.



## CONSULTA BIBLIOGRÁFICA

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (Junio de 1999). Clorofenoles (Chlorophenols). Clorofenoles (Chlorophenols) . Atlanta, Estados Unidos: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
2. American Water Works Association. (2002). Calidad y tratamiento del agua (Primera edición ed.). España: McGraw-Hill.
3. Apella, M. C., & Araujo, P. Z. (2005). Microbiología del Agua. Conceptos Básicos. En C. I. Europea, Solar Safe Water (págs. 33-50). Madrid, España: Unión Europea.
4. Ashbolt, N. J. (2004). Risk Analysis of Drinking Water Microbial Contamination versus Disinfection By-Products (DBPs). *Toxicology* , 255-262.
5. Aurazo de Zumaeta, M. (2004). Capítulo 2. Aspectos Biológicos de la Calidad del Agua. En L. Cánepa de Vargas, V. Maldonado Yactayo, A. Barrenechea Martel, & M. Aurazo de Zumaeta, Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Plantas de Filtración Rápida. Manual I: Teoría. Tomo I (págs. 58-102). Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
6. Bandala, E. R., Corona-Vásquez, B., Guisar, R., & Uscanga, M. (2007). Aplicación de Procesos Avanzados de Oxidación en la Desactivación Secuencial de Microorganismos Resistentes en el Agua. *Ciencia...Ahora* (20), 52-63.
7. Bandala, E., Corona-Vásquez, B., Guisar, R., & Uscanga, M. (2007). Aplicación de Procesos Avanzados de Oxidación en la Desactivación Secuencial de Microorganismos Resistentes en Agua. *Ciencia...Ahora* , 52-63.
8. Barrenechea Martel, A. (2004). Capítulo 1: Aspectos Físicoquímicos de la Calidad del Agua. En L. Cánepa de Vargas, V. Maldonado Yactayo, A. Barrenechea Martel, & M. Aurazo de Zumaeta, Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Plantas de Filtración Rápida. Manual I: teoría. Tomo I (págs. 03-53). Lima: Organización Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
9. Barrenechea Martel, A., & Cánepa de Vargas, L. (2004). Capítulo 10: Desinfección. En L. Cánepa de Vargas, V. Maldonado Yactayo, A. Barrenechea Martel, & M. Aurazo de Zumaeta, Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Plantas de Filtración Rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. (págs. 154-214). Lima: Organización

Panamericana de la Salud. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

10. Blanco, J., Blanco, M., Blanco, J. E., Mora, A., Alonso, M. P., González, E. A., y otros. (2002). Enterobacterias: Características Generales. Género Escherichia. En S. Vadillo, S. Píriz, & E. Mateos, Manual de Microbiología Veterinaria (págs. 301-325). España: McGraw-Hill Interamericana.
11. Blesa, M. A., Navntoft, C., & Dawidowski, L. (2005). Modelado de la Radiación Solar UV para Aplicaciones en Tratamiento de Aguas. En C. I. Europea, Solar Safe Water (págs. 99-118). Madrid: Unión Europea.
12. Bohórquez Ballén, J., & Pérez Mogollón, J. F. (2007). Radiación Ultravioleta. Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular , 97-104.
13. Canche Uuh, J. A. (2007). Estudio de la Aplicación de Tecnologías de Oxidación Avanzada basadas en Dióxido de Titanio, Peróxido de Hidrógeno y Luz Ultravioleta como Complemento a la Cloración en Tratamientos de Potabilización de Aguas Naturales. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.
14. Cassanova, M. A. (1998). La Evaluación Educativa. España: Muralla.
15. Castillos, C. (2007). Tercer Encuentro Nacional de Energía Solar. Colectores Solares (págs. 39-60). Montevideo: X CEUTA.
16. Catalán, L. J. (1990). Química del Agua (Segunda edición ed.). Bellisco: Librería Editorial.
17. Chang, S. L. (1968). Waterborne viral infections and their prevention. Bulletin of the World Health Organization, 38(3), 401.
18. Collares-Pereira, M. (2005). Energía Solar y Óptica sin Imágenes para la Producción de Agua Limpia. En C. I. Europea, Solar Safe Waterq (págs. 119-134). Madrid: Unión Europea.
19. Córdova Islas, A. M. (13 de Septiembre de 2010). Evaluación de la Educación. Buenos Aires, Argentina.
20. Diao, H. F., Li, X. Y., Gu, J. D., Shi, H. C., & Xie, Z. M. (2003). Electron microscopic investigatin of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction. ScienceDirect .

21. Domenech, X., Jardim, W. F., & Litter, M. I. (2004). Procesos Avanzados de Oxidación para la Remoción de Contaminantes. En M. A. Belsa , & B. Sánchez, Remoción de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Madrid, España: CIEMAT.
22. Domínguez, J. R., Beltrán, J., & Rodríguez, O. (2005). Vis and UV photocatalytic detoxification methods(using TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, Fe(III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Fe(III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) for dyes treatment. Science Direct (101), 389-395.
23. Donnenberg, M. (2002). Escherichia coli: Virulence Mechanisms of a Versatile Pathogen. USA: Elsevier Science Inc.
24. Escher dos Santos, L. M. (2010). Mutagenicidade promovida pela degradação da amoxicilina com reagente Fenton. Estudos, Goiânia , 381-401.
25. Fair, G. M., Geyer, J. C., & Okun, D. A. (1996). Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. México: LIMUSA.
26. Faleiro Naves, P. L. (2010). Formación de Biopelículas por "Escherichia coli" y su Correlación con Factores de Virulencia: Prevención y Actividad de Antimicrobianos Frente a Organismos Planctónicos y Asociados a Biopelículas. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia, Departamento de Microbiología II.
27. Fernández, J. (1998). Nueva Forma de Potabilizar el Agua. Colombia: Agencia UAPEC.
28. Fernández, P., Blanco, J., Sichel, C., & Malato, S. (2005). Water disinfection by solar photocatalysis using compound parabolic collectors. Science Direct (101), 345-352.
29. Fortea Gorraiz, D. (2010). Estudio de la Degradación de Sustancias Peligrosas Presentes en Aguas de Salida de EDAR mediante Tratamiento Fenton. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Centro Politécnico Superior.
30. Gálvez, B. (2005). El Reactor Solar Fotocatalítico: estado del arte. En C. I. Europea, Solar Safe Water (págs. 277-302). Madrid: Unión Europea.
31. García Rojas, J. L., Cortés Muños, J. E., & Córdova Rodríguez, M. A. (2002). Evaluación de compuestos desinfectantes en la eliminación de virio cholerae y

escherichia coli presentes en agua. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México: AIDIS.

32. García Suescun, I. (2010). Aplicación de tratamientos basados en ozono en la regeneración de aguas residuales. Estudio de la degradación de sustancias peligrosas. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Centro Politécnico Superior. Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.
33. Gomes, A. I., Santos, J. C., Vilar, V. J., & Boaventura, R. A. (2009). Inactivation of bacteria *E. coli* and photodegradation of humic acids using natural sunlight. *El Servier* (88), 283-291.
34. González Garrido, C. (2001). La Luz Ultravioleta: una solución amigable con el medio ambiente para la desinfección del agua y el aire. Santiago: Ambiental SOCOTER.
35. Gopal, K., Tripathy, S. S., Bersillon, J. L., & Dubey, S. P. (2007). Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. *Journal of Hazardous Materials* , 1-6.
36. Grossi Gallegos, H. (2005). Disponibilidad y Características de la Radiación Solar en Sudamérica. En C. I. Europea, *Solar Safe Water* (págs. 93-98). Madrid: Unión Europea.
37. Guisar, R. (2006). Inactivación de esporas de *Bacillus subtilis* con fotocatalisis solar. Tesis de licenciatura. Ingeniería civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas Puebla.
38. Hawker, L. E., Linton, A. H., Folkes, B. F., & Carlile, M. J. (1964). *Elementos de Microbiología General: Introducción a la Biología de los Microorganismos*. Zaragoza: Editorial ACRIBIA.
39. Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental* (Segunda edición ed.). México: Prentice Hall.
40. Hua, G., & Reckhow, D. A. (2007). Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants. *Science Direct* (41), 1667-1678.
41. Huang, D. B., Okhuysen, Z. D., & Jiang. (2004). Enterogregative *Escherichia coli*: an emerging enteric pathogen. *Am J. Gastroenterol* , 383-389 .

42. Ignachewski, F., Toshio Fujiwara, S., Cótica, L. F., Melo Carneiro, L., Tauchert, E., & Peralta-Zamora, P. (2010). Degradation of reactive dyes by photo.fenton process using Fe(III) immobilized in molecular sieve. *Quim. Nova* , XXXIII (8), 1640-1645.
43. Iriarte-Velasco, U., Álvarez-Uriarte, J. I., & González-Velasco, J. R. (2007). Removal and structural changes in natural organic matter in a Spanish water treatment plant using nascent chlorine. *Science Direct* (57), 152-160.
44. Jaramillo Cazco, C. N. (2010). *Desinfección del Agua para Uso Humano*. Educador: QUITO.
45. Jiménez Cisneros, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores.
46. Karmali, M. A. (1989). Infection by Verotoxin - Producing E. coli. *Clin. Microbiol.* (2), 15-38.
47. Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental Fundamentos, Entornos, Tenologías y Sistemas de Gestión* (Primera ed.). España: McGraw Hill.
48. Litter, M. I. (2005). Tecnologías avanzadas de oxidación: tecnologías solares. En M. A. Blesa, J. Blanco Gálvez, & T. e. SOLARSAFEWATER [ENCUENTRO], *Solar Safe Water* (págs. 73-89). San Martin: Universidad Nacional de General San Martín.
49. Litter, M. I. (2005). Tecnologías Avanzadas de Oxidación: tecnologías solares. En C. I. Europea, *Solar Safe Water* (págs. 73-90). Madrid: Unión Europea.
50. López Alegría, P. (2010). *Abastecimiento de Agua Potable: y disposición y eliminación de excretas*. México: Instituto Politécnico Nacional.
51. López López, L. (2009). *El Agua en el Arte*. Aguaxaca , 06-08.
52. Maas Tun, P. K. (2013). *Evaluacion Educativa*. Chetumal.
53. Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2003). *Biología de los Microorganismos* (Décima edición ed.). Madrid: PEARSON.
54. Marín , G. R. (2006). *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos: tratamiento y control de calidad de aguas*. España: Ediciones Díaz de Santos.
55. Metcalf & Eddy. (1995). *Ingenieria de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* . Madrid: Mc. Graw-Hill.

56. Michanie, S. (2003). *Escherichia coli O157:H7: La bacteria que disparó el HACCP en la industria de la carne. Énfasis alimentos* , 1-7.
57. Miliwebsky, E. S., Balbi, L., Gómez, D., Wainsztein, R., Cueto Rúa, M., Roldán, C., y otros. (1999). Síndrome Urémico Hemolítico en niños de Argentina: asociación con la infección por *Escherichia coli* productor de toxina Shiga. *Bioquímica y Patología clínica* (63), 113-121.
58. Moncayo-Lasso, A., Sanabria, J., Pulgarin, C., & Benítez, N. (2009). Simultaneous *E. coli* inactivation and NOM degradation in river water via photo-Fenton process at natural pH in solar CPC reactor. A new way for enhancing solar disinfection of natural water. *Chemosphere* , 296-300.
59. Mora Vargas, A. I. (2004). *La Evaluación Educativa: concepto, periodos y modelos. Actualidades Investigativas en Educación* , 02-28.
60. Neidhard, F. (1999). *Escherichia coli and Salmonella: celular and molecular biology*. Weshington: ASM Press.
61. Olivares Castruita, S. V., Macías Sánchez, j., Hinojosa Reyes, L., Guzmán Mar, J. L., Peralta-Hernández, J. M., & Hernández-Ramírez, A. (2010). Decoloración y mineralización de una mezcla de colorantes azo mediante el proceso Foto-Fenton. Congreso Internacional de QFB 2010 (págs. 1-6). San Nicolás de los Garza: Revista Salud Pública y Nutrición.
62. Olomedo Sánchez, M. T. (2008). Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. *Higiene y Sanidad Ambiental* , 335-342.
63. Paleologou, A., Marakas, H., Xekoukoulotakis, N. P., Moya, A., Vergara, Y., Kalogerakis, N., y otros. (2007). Disinfection of water and wastewater by TiO<sub>2</sub> photocatalysis, sonolysis and UV-C irradiation. *Science Direct* (129), 136-142.
64. Paton, J. C., & Paton, A. W. (1998). Pathogenesis and Diagnosis of Shiga Toxin Producing *E. coli* Infections. *Clin. Microbiol.* , 450-479.
65. Pérez Castillo, H. (25 de Noviembre de 2008). *Acciones Desinfectantes en la Potabilización del Agua en Pequeñas Comunidades*. Universidad de Sucre.
66. Pérez Martínez, M., Cuesta Santianes, M. J., & Cabrera, J. A. (2009). *Detoxificación Solar. Prospectiva y Vigilancia Tecnológica* , 1-41.

67. Pey Clemente, J. (2008). Aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada (Fotocatálisis solar) para el Tratamiento y Reutilización de Efluentes Textiles. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
68. Pierce, B. A. (2009). Genética: un enfoque conceptual (Tercera edición ed.). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
69. Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2002). Microbiology (5th edition ed.). USA: Mc-Graw-Hill.
70. Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marqués, R., & Villalobos Moreto, F. (2003). El Agua en el Medio Ambiente: muestreo y análisis. México: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
71. Richter, C. (1984). Desinfección. En B. I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Evaluacion de plantas de tratamiento de agua. Manual DTIAPA (págs. 271-295). Peru: Banco Interamericano de Desarrollo, Organizacion Panamericana de la Salud.
72. Rincón, A. G., & Pulgarin, C. (2005). Comparative evaluation of Fe<sup>3+</sup> and TiO<sub>2</sub> photoassisted processes in solar photocatalytic disinfection of water. Applied Catalysis B: Enviromental , 222-231.
73. Rincón, Á. G., Giraldo, S. A., & Pulgarín, C. (2005). Desinfección de Agua por Fotocatálisis. Aspectos Básicos. En C. I. Europea, Solar Safe Water (págs. 203-226). Madrid: Unión Europea.
74. Romero Cabello, R. (2001). Microbiología y parasitología humana Bases etiológicas de las enfermedades infecciosas. México: Editorial Médica Panamericana S.A. de C.V.
75. Romero Rojas, J. A. (1999). Calidad del Agua (Segunda edición ed.). México: Alfaomega.
76. Romero Rojas, J. A. (1999). Potabilización del Agua. México: ALFA OMEGA Grupo Editor, S.A. de C.V.
77. Sadiq, R., & Rodriguez, M. J. (2004). Disinfection By-Products (DBPs) in Drinking Water and Predictive Models for their Occurrence: a review. Science of the Total Environment , 21-46.

78. Salguero Fernández, V. (2008). Valoración de Colectores Solares Térmicos Planos de Vacío para la Producción de Frío. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid; Escuela Politécnica Superior; Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos .
79. Sarria, V. M., Parra, S., Rincón, Á. G., Torres, R. A., & Pulgarín, C. (2005). Nuevos Sistemas Electroquímicos y Fotoquímicos para el Tratamiento de Aguas Residuales y de Bebida. *Revista Colombiana de Química* , XXXIV (2), 161-173.
80. Scaletsky, I. C., Fabricotti, S. H., Carvalho, R. L., Nunes, C. R., Maranhao, H. S., Morais, M. B., y otros. (2002). Diffusely Adherent Escherichia coli as a Cause of Acute Diarrhea in Young Children in Northeast Brazil: a case - control study. *J. Clin. Microbiol.* , 645-648.
81. Scheutz, F., & Strockbine, N. A. (2005). Genus I. Escherichia castellani and Chalmers 1919. En G. M. Garrity, *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Second Edition ed., Vol. II, págs. 607-624). USA: Bergey's Manual Trust USA.
82. Secretaria de Salud. (1994). NOM-127-SSA1-1994. México: Diario Oficial.
83. Selvakumar, A., Tuccillo, M. E., Muthukrishnan, S., & Ray, A. B. (2009). Use of Fenton's Reagent as a Disinfectant. *Remediation: the journal of environmental cleanup costs, technologies, & techniques* , 135-142.
84. Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). Métodos Alternativos. En CEPIS, *Desinfección del agua* (págs. 153-175). Lima: CEPIS.
85. Spuhler, D., Rengifo-Herrera, J. A., & Pulgarin, C. (2010). The effect of Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and the photo-Fenton reagent at near neutral pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing Escherichia coli K12. *El Sevier* , 126-141.
86. Spuhler, D., Rengifo-Herrera, J. A., & Pulgarin, C. (2010). The effect of Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and the photo-Fenton reagent at near neutral pH on the solar disinfection (SODIS) at low temperatures of water containing Escherichia coli K12 . *ScienceDirect* .
87. Stainer, R. Y., Adelberg, E. A., & Ingraham, J. L. (1986). *Microbiología*. México: Ediciones REPLA, S.A.
88. Stainer, R. Y., Ingraham, J. L., & Painter, P. R. (1992). *Microbiología*. Segunda Edición. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.



89. Tapia S., S., & Del Río P., J. A. (2009). Concentrador Parabólico Compuesto: una descripción opto-geométrica. *Revista Mexicana de Física* (55), 141-153.
90. Tebbutt, T. (1990). *Fundamentos de Control de la Calidad del Agua*. México: Limusa Noriega.
91. United States Environmental Protection Agency. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: desinfección con ozono. Washington, D.C.: Office of Water .
92. Uyak, V., Koyuncu, I., Oktem, I., Cakmakci, M., & Toroz, I. (2007). Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes. *Science Direct* , 1-5.
93. Walter, J., & Weber, J. (1979). *Control de la Calidad del Agua: procesos fisicoquímicos* (reimpresión ed.). España: Reverté.
94. Wang, G.-S., Deng, Y.-C., & Lin, T.-F. (2007). Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water. *Science Direct* (387), 86-95.
95. Wang, G.-S., Deng, Y.-C., & Lin, T.-F. (2007). Cancer Risk Assessment from Trihalomethanes in Drinking Water. *Science of the Total Environment* , 86-95.
96. Wang, W., Ye, B., Yang, L., Li, Y., & Wang, Y. (2007). Risk Assessment on Disinfection By-Products of Drinking Water of Different Water Sources and Disinfection Processes. *Environment International* , 219-255.
97. Wegelin, M. (2002). *Método SODIS*. Dubendorf: Departamento de Agua y Saneamiento para Países en Vías de Desarrollo (SANDEC).
98. Wells, J. G., Davis, B. R., Wachsmuth, I. K., Riley, L. W., Remis, R. S., Sokolow, R., y otros. (1983). Laboratory Investigation of Hemorrhagic Colitis Outbreaks Associated with a rare *Escherichia coli* serotype. *J. Clin. Microbiol.* (18), 512-520.
99. Zhang, X., & Minear, R. A. (2006). Removal of low-molecular weight DBPs and inorganic ions for characterization of high-molecular weight DBPs in drinking water. *Science Direct* (40), 1043-1051.

## FUENTES ELECTRÓNICAS

100. ACQUATRON S.A. (2011). Desinfección con Cloro: ACQUATRON SA. Recuperado el 17 de Octubre de 2012, de sitio Web ACQUATRON S.A.: [http://www.acquatron.com.ar/pdf/desinfeccion\\_con\\_cloro.pdf](http://www.acquatron.com.ar/pdf/desinfeccion_con_cloro.pdf)
101. Colegio Manuel Elkin Patarroyo. (25 de Julio de 2008). Doc. Aprendizaje significativo: TRIPOD. Recuperado el 17 de Enero de 2013, de sitio Web TRIPOD: <http://manuelkinpatarroyo.tripod.com/id29.html>
102. Ecoportal Ambiente y Sociedad. (15 de Septiembre de 2003). Ecoportal.net. Recuperado el 3 de Noviembre de 2011, de <http://www.ecoportal.net/content/view/full/169/offset/20>
103. Freeman, D., & Szymanski, C. (2005). Sends Critical Water Purification Tools to Tsunami Survivors. Recuperado el 10 de Octubre de 2012, de PSI Healthy Lives. Measurable Results: <http://www.psi.org/news/0105a.html>
104. Garrido Hoyos, S. E. (9 de Junio de 2003). Consideraciones sobre los Productos de la Desinfección: HidroRed. Recuperado el 30 de Octubre de 2012, de sitio Web HidroRed: [http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo\\_14.pdf](http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_14.pdf)
105. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). (2009). Introducción a la Radiación Ultravioleta (UV) y Ozono: INTA. Recuperado el 31 de Octubre de 2012, de sitio Web INTA: <http://www.inta.es/noticias/documentos/Ultravioleta.pdf>
106. LEENTECH. (2009). Water Treatment Solutions LEENTECH. Recuperado el 25 de Abril de 2010, de sitio web de Leentech agua residual & purificación del aire Holding B. V: <http://www.lenntech.es/turbidez.htm>
107. López Álvarez, J. (17 de Septiembre de 2012). Escherichia coli: Mecanismos de Patogenicidad: Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad Autónoma de México . Recuperado el 3 de Septiembre de 2012, de sitio web Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad Autónoma de México: <http://www.fm.vz.unam.mx/fmvz/cienciavet/revistas/CVvol1/CV1v1c01.pdf>
108. Luna Argudin, M. (14 de Octubre de 2011). Aprendizaje significativo: Habilidades Docentes. Recuperado el 17 de Enero de 2013, de sitio Web Habilidades Docentes: <http://hadoc.azc.uam.mx/enfoques/significativo.htm>

109. Ochoa Woodell, T. J. (2006). Diarrea producida por Escherichia coli: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Sistema de Bibliotecas. Recuperado el 23 de Septiembre de 2012, de sitio Web Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Sistema de Bibliotecas: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/speit/2006\\_n2/pdf/a03.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/speit/2006_n2/pdf/a03.pdf)
110. Psicología de la educación para padres y profesionales. (s.f.). Definición de aprendizaje significativo: psicopedagogía. Recuperado el 17 de Enero de 2013, de sitio Web Psicopedagogía: <http://www.psicopedagogia.com/definicion/aprendizaje%20significativo>
111. PURION. (2011). Purion The Best Solution . Recuperado el 6 de Noviembre de 2013, de <http://www.purion.de/es/technology.php>
112. Todar, K. (2008). Pathogenic E. coli: Online Textbook of Bacteriology. Recuperado el 2010, de Online Textbook of Bacteriology:: <http://textbookofbacteriology.net/e.coli.html>
113. Varela, G., & Grotiuz, G. (2008). Fisiología y metabolismo bacteriano: Instituto de Higiene. Recuperado el 29 de Diciembre de 2012, de Instituto de Higiene: <http://www.higiene.edu.uy/cefa/2008/FisiologiayMetabolismoBacteriano.pdf>
114. World Health Organization. (Enero de 2012). Water Sanitation Health. Recuperado el 15 de Noviembre de 2011, de [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_7\\_fig.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_7_fig.pdf)