

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGIA



***“APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA ELIMINACIÓN
DE *Escherichia coli* EN AGUA DE POZO PARA CONSUMO HUMANO, EN LA
COMUNIDAD PATRICIA PUERTAS DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA
COLIMA, MUNICIPIO DE SUCHITOTO, DEPARTAMENTO DE CUSCATLÁN”.***

PRESENTADO POR:

GILBERTO ELENILSON LOPEZ GOMEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2013.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE BIOLOGIA

***“APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA ELIMINACIÓN
DE Escherichia coli EN AGUA DE POZO PARA CONSUMO HUMANO, EN LA
COMUNIDAD PATRICIA PUERTAS DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA
COLIMA, MUNICIPIO DE SUCHITOTO, DEPARTAMENTO DE CUSCATLÁN”.***

PRESENTADO POR:

LOPEZ GOMEZ, GILBERTO ELENILSON

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

ASESORA: _____

M.Sc. ZOILA VIRGINIA GUERRERO MENDOZA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2013.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE BIOLOGIA

“APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA ELIMINACIÓN DE Escherichia coli EN AGUA DE POZO PARA CONSUMO HUMANO, EN LA COMUNIDAD PATRICIA PUERTAS DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA COLIMA, MUNICIPIO DE SUCHITOTO, DEPARTAMENTO DE CUSCATLÁN”.

PRESENTADO POR:

LOPEZ GOMEZ, GILBERTO ELENILSON

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

JURADO: _____

Licda. ANGELA GUDELIA PORTILLO ZELAYA

JURADO: _____

Dr. RIGOBERTO AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2013.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FISCAL GENERAL

LIC. FRANCISCO CRUZ LETONA

DECANO DE FACULTAD

M.Sc. MARTÍN ENRIQUE GUERRA CÁCERES

SECRETARIO DE FACULTAD

LIC. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA APARICIO

DIRECTOR ESCUELA DE BIOLOGÍA

LIC. RODOLFO FERNANDO MENJÍVAR

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2013

ASESORES Y JURADOS

ASESORA:

M.Sc. ZOILA VIRGINIA GUERRERO MENDOZA

JURADO:

Licda. ANGELA GUEDELIA PORTILLO ZELAYA

JURADO

Dr. RIGOBERTO AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2013

Tabla de contenido

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE ANEXOS.....	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	4
3.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	4
3.2. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA.....	4
3.3. MICROORGANISMOS PATÓGENOS MÁS COMUNES EN EL AGUA.....	5
3.3.1. <i>Vibrio cholerae</i>	5
3.3.2. <i>Escherichia coli</i>	5
3.3.3. <i>Salmonella spp.</i>	6
3.3.4. <i>Giardia lamblia</i>	7
3.4. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA	7
3.4.1. PARÁMETROS FÍSICOS.....	7
3.4.2. PARÁMETROS QUÍMICOS.....	8
3.4.3. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.....	9
3.5. HISTORIA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA.....	10
3.6. HISTORIA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA POR MEDIO DE RADIACIÓN SOLAR	10
3.7. MÉTODOS DE DESINFECCIÓN.....	11
3.7.1. TÉCNICA SODIS.....	11
3.7.2. RADIACIÓN SOLAR.....	11
3.7.3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)	12
3.7.4. FOTOCATÁLISIS.....	13
3.7.5. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.....	15
3.7.6. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TIO ₂	15

3.8. ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i>	16
3.9. NORMATIVAS.....	17
3.9.1. NORMATIVAS INTERNACIONALES.....	17
3.9.2. NORMATIVA SALVADOREÑA.....	17
3.10. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO POR FILTRACIÓN DE MEMBRANA.....	18
3.10.1. PROCESO DE FILTRACIÓN POR MEMBRANA.....	18
3.10.2. DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂).	19
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	22
4.2. FASE DE CAMPO	23
4.2.1. MUESTREO	23
4.2.2. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	24
4.3. FASE DE LABORATORIO	25
4.3.1. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	25
4.3.2. FABRICACIÓN DE CONCENTRADOR SOLAR.....	25
4.3.3. ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i> POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.....	26
4.3.4. DETERMINACIÓN DE CALIDAD BIOLÓGICA Y QUÍMICA DEL AGUA MEDIANTE ANÁLISIS DE DBO Y DQO.....	28
4.3.5. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i>	30
4.4. FASE DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	30
5. HIPÓTESIS.....	33
6. RESULTADOS	34
6.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE LOS POZOS MUESTREADOS.....	34
6.2. ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i> POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.....	36
6.3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i> . ..	39
7. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	41
7.1 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA EN LOS DIEZ POZOS DE MUESTREO	41
7.2. ANÁLISIS DEL pH EN LOS DIEZ PUNTOS DE MUESTREO.....	42
7.3. ANÁLISIS DE UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS.....	43

7.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO DE ELIMINACIÓN DE <i>Escherichia coli</i> POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.	44
7.5. ANOVA PARA COLIFORMES FECALES RESPECTO AL TIEMPO.....	46
7.6. ANOVA PARA COLIFORMES FECALES DE ACUERDO A LA CONCENTRACIÓN DE TiO ₂	47
7.7. ANÁLISIS DEL CRUCE ENTRE LA VARIABLES TIEMPO DE EXPOSICIÓN Y CONCENTRACIÓN DE TiO ₂	49
7.8. ELABORACIÓN DE UN MANUAL.....	51
8. DISCUSIÓN.....	54
9. CONCLUSIONES.....	57
10. RECOMENDACIONES.....	58
11. BIBLIOGRAFÍA.....	59
12. ANEXOS.....	64
13. LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	73
14. GLOSARIO.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

1	Parámetros físico-químicos y microbiológicos encontrados en pozos muestreados	36
2	Eliminación de <i>E. coli</i> pasados 30 minutos de exposición	38
3	Eliminación de <i>E. coli</i> pasados 60 minutos de exposición	38
4	Eliminación de <i>E. coli</i> pasados 90 minutos de exposición	39
5	Eliminación de <i>E. coli</i> pasados 120 minutos de exposición	39
6	Resultados de pruebas microbiológicas y parámetros físico-químicos de la determinación de eliminación de <i>Escherichia coli</i> con TiO ₂ durante un período de ocho días	40
7	Estadísticos descriptivos para la temperatura	41
8	Estadísticos descriptivos para Unidades Formadoras de Colonia	43
9	Tabla de contingencia Concentración–Tiempo para UFC Coliformes totales	45
10	Tabla de contingencia Concentración – Tiempo para UFC Coliformes fecales	45
11	Análisis de varianza para Coliformes Fecales respecto al tiempo	46
12	Análisis de varianza para Coliformes Fecales	47
13	Comportamiento de UFC de coliformes fecales según interacción entre tiempo y concentración de TiO ₂	49

ÍNDICE DE GRÁFICOS

1	Temperatura de los pozos muestreados	41
2	Medición de pH de los 10 pozos muestreados	42
3	Medición de Unidades Formadoras de Colonias (UFC)	43
4	Medias aritméticas de las UFC de acuerdo al tiempo	46
5	Medias aritméticas de las UFC de acuerdo a la concentración	48
6	Comportamiento de UFC de coliformes fecales según interacción entre tiempo y concentración de TiO ₂	49

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ubicación del Área Natural Protegida Colima.	22
2	Toma de muestras. a) Pozo donde se realizó la toma de muestras, b) Obtención de agua, c) Muestras debidamente etiquetadas.	23
3	Muestras de agua de colocadas en hielo a 4°C.	24
4	Toma de parámetros físico-químicos. a) Toma de temperatura, b) Medición de pH.	24
5	Equipo de filtración por membranas al vacío.	25
6	Esquema de concentrador solar.	26
7	Pozo N°4 identificado como el pozo más contaminado.	26
8	Pesaje y aplicación de TiO ₂ . a) Pesaje de TiO ₂ , b) Elaboración de sobres con TiO ₂ en diferentes concentraciones, c) Botellas de plástico PET utilizadas en proceso de eliminación por fotocátalisis heterogénea.	27
9	Concentrador solar de paredes planas con botellas plásticas PET colocadas al sol.	27
10	Proceso de filtración por membrana y análisis microbiológico. a) Proceso de filtración al vacío, b) Membrana de nitrato de celulosa en petrifilm aqua 3M, d) Incubación de 24 horas a 37°C, e) Placas petri con agar EMB para identificar presencia de <i>E. coli</i>	28
11	Parámetros físico-químicos y microbiológicos. a) Medición de pH, b) Medición de temperatura y c) Presencia de <i>Escherichia coli</i>	34
12	Muestras de los 10 pozos y placas petrifilm 3M. a) Envases con muestras de 100 ml de agua de pozo, b) Petrifilm aqua 3M para análisis microbiológico	35
13	Proceso de fotocátalisis heterogénea. a) Botellas PET con 3 lts de agua de pozo, b) aplicación de TiO ₂ en suspensión, c) botellas en concentrador solar de paredes planas	37
14	Figura 14. Manual para la elaboración de un concentrador solar y proceso de desinfección de agua por medio de fotocátalisis heterogénea utilizando TiO ₂ . a) Portada, b) Índice, c) Introducción, d) Materiales para elaborar un concentrador solar, e) Procedimiento para elaborar un concentrador solar, f) Materiales para el proceso de desinfección de agua, g) Procedimiento para el proceso de desinfección de agua, h) Bibliografía.	51

ÍNDICE DE ANEXOS

1	Valores Máximos Admisibles para Calidad Microbiológica.	62
2	Valores de calidad físico-químicos para agua potable.	62
3	Niveles de transmitancia de distintos tipos de botellas.	63
4	Método SODIS.	65
5	Reflectividad promedio de diferentes materiales.	66
6	Proceso fotocatalítico de una partícula de TiO_2 .	66
7	Procedimiento para realizar análisis microbiológico en placas petrifilm 3M	67

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme finalizar con éxito este trabajo de graduación, que a pesar de todas las dificultades que se presentaron en el desarrollo de éste nunca me abandonó; al mismo tiempo quiero agradecer a mi madrecita la Virgen María por llenarme de paciencia especialmente en esos momentos de desesperación cuando quería abandonar todo; a San Marcelina Champagnat quien me enseñó que el amor a la Virgen, me lleva a Jesús.

Quiero agradecer a mi madre, que nunca dejó de brindarme su apoyo ni dejó de creer en mí; quiero agradecer a mi padre, porque hasta el día de hoy me enseña que nunca hay que darse por vencido, que hay que luchar por nuestros sueños y porque las ganas de salir adelante y ser mejor cada día nunca se acaba.

De la manera más especial quiero agradecer a quien no solo es mi esposa y el amor de mi vida, sino también mi mejor amiga y en este caso mi asesora estadística, porque siempre tuve su apoyo, porque nunca dejó que me diera por vencido, porque sus palabras de aliento fueron lo que me dió la energía y los ánimos para seguir adelante y terminar mi tesis.

Quiero agradecer a mi asesora de tesis, la Licenciada Virginia Guerrero quien siempre tuvo tiempo para mi persona y siempre me brindó palabras de aliento, me enseñó que las cosas solo se hacen de una forma, con excelencia y calidad, me enseñó a ser un verdadero profesional.

Agradezco a la Licenciada María Evelyn Sánchez y demás personal de CENSALUD quienes me brindaron su ayuda poniendo a mi disposición el laboratorio de microbiología y el aparato de filtración al vacío.

Un agradecimiento muy especial a mis jurados, la Licda. Gudelia Portillo y el Dr. Rigoberto Ayala por brindarle el tiempo y atención a mi tesis, porque sus observaciones hicieron que mi trabajo de graduación tuviese una mejor calidad.

A Sammy y Pinky porque me acompañaron fielmente en todas aquellas noches de desvelo.

También agradezco a mis compañeros y amigos que fui haciendo durante tantos años de estudio, porque sin su apoyo y ayuda los trabajos que realizamos durante años no hubiesen dado los frutos que hoy me da.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis maestros que durante todos estos años me enseñaron e inculcaron con el ejemplo lo que es ser un buen biólogo.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de graduación principalmente a Dios y la Virgen, porque ellos son los que guían mi vida.

A mi madre, quien nunca dejó de creer en mí y me apoyo siempre, que me enseñó que la vida te puede poner muchos obstáculos pero que siempre se pueden superar.

A mi padre, porque su apoyo nunca me faltó y porque ha sido el mejor ejemplo de perseverancia, porque me enseñó que nunca es tarde para aprender y que nunca hay que darse por vencido y hay que luchar siempre para seguir adelante.

A mi esposa y el amor de mi vida Reina, porque siempre has estado a mi lado, en las buenas y en las malas, porque tu amor, apoyo y ayuda ha sido vital, porque eres la que siempre me anima cuando todo se ve mal.

A mi hija, Alejandra, porque es ella mi razón de ser, por ser el motor que me mueve y motiva cada día a ser mejor. Espero que cuando seas grande comprendas que este es mi regalo para ti, una muestra que aunque el camino esté lleno de obstáculos siempre los podemos superar, que hay que luchar por nuestros sueños y que nunca es tarde para salir adelante; cuando se tiene a Dios, la Virgen y la familia, no hay nada que nos pueda detener.

Los amo

Gilberto.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se desarrolló un método de desinfección de agua de pozo por medio de fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2) como catalizador. Este proceso se llevó a cabo utilizando agua de pozo de la comunidad Patricia Puertas del Área Natural Protegida Colima, que pertenece al municipio de Suchitoto del departamento de Cuscatlán. Para desarrollar el método de desinfección se tomaron una serie de parámetros físico-químicos y microbiológicos para determinar el nivel de contaminación; luego se aplicó el método de desinfección por medio fotocátalisis heterogénea al agua de pozo, colocando diferentes concentraciones de TiO_2 en suspensión a botellas PET de 3 litros de capacidad en un concentrador solar de paredes planas colocado al sol durante diferentes tiempos para determinar el tiempo y concentración óptimo que permitiría la mayor eliminación de *Escherichia coli*; al determinar el tiempo y concentración óptimos, se realizó el proceso de eliminación de *Escherichia coli* por fotocátalisis heterogénea para determinar la capacidad de eliminación del método utilizado. El TiO_2 y la luz penetran a través de la célula y es absorbida por el ácido nucléico; la absorción de la luz ultravioleta por el ácido nucléico provoca una reordenación de la información genética, lo que interfiere con la capacidad reproductora de la célula, por consiguiente la *Escherichia coli* es eliminada por el TiO_2 y la luz UV como resultado del daño fotoquímico.

ABSTRACT

In this research we developed a method of water disinfection by heterogeneous photocatalysis using titanium dioxide (TiO_2) as a catalyst. This process is carried out using Patricia Puertas community water, Colima Natural Protected Area, which belongs to the municipality of Suchitoto, Cuscatlán department. To develop the method of disinfection took a series of physic-chemical and microbiological tests to determine the level of contamination, then applied to the water disinfection method by heterogeneous photocatalysis, placing different concentrations of TiO_2 in suspension bottles PET 3 liters in a solar concentrator flat wall placed in the sun for various times to determine the optimal time and concentration that would allow increased removal of *Escherichia coli*, when we determined the optimal time and concentration, was performed removal process by heterogeneous photocatalysis *Escherichia coli* to determine the disposal capacity of the method used. TiO_2 and the light penetrating through the cell and is absorbed by the nucleic acid, the absorption of ultraviolet light by the nucleic acid causes a rearrangement of genetic information, interfering with the reproductive capacity of the cell, consequently *Escherichia coli* is eliminated by the TiO_2 and UV light as a result of the photochemical damage.

1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías tradicionales de tratamiento de aguas son extraordinariamente caras, por lo que se hace necesario el desarrollo de tecnologías simples, eficientes y de bajo costo para la eliminación in situ de estas sustancias (Litter y Mansilla 2003).

Los problemas relacionados con la calidad del agua en El Salvador son muy complejos y se acentúan por la falta de técnicas bien establecidas para desinfección y descontaminación. Las enfermedades están asociadas a las deficiencias en los sistemas de distribución de agua las cuales son responsables del 30% de los casos de muerte en América Latina; seis veces más el porcentaje presente de países desarrollados (Garrido 2000).

Para disminuir estos problemas se han utilizado tecnologías convencionales como la cloración, para remover microorganismos de las aguas contaminadas; aunque estos sistemas de control tienen importantes aplicaciones, se han desarrollado métodos alternativos de desinfección debido a crecientes preocupaciones acerca de la toxicidad de los derivados residuales clorados (Tosa e Hirata 1999).

La calidad del agua constituye uno de los principales desafíos socio-ambientales en El Salvador. La contaminación del agua se profundizó durante las últimas décadas y pasó a constituir un problema generalizado para la población y los ecosistemas. A pesar de contar con un marco relativamente amplio de instrumentos regulatorios para enfrentar la contaminación del agua, El Salvador ha experimentado una tendencia creciente de casos de enfermedades de origen hídrico, tales como la diarrea y el parasitismo intestinal, afectando principalmente a la población infantil.

En el departamento de Cuscatlán, municipio de Suchitoto posee una población de 16,347 habitantes, con un crecimiento poblacional anual de un

2.28 %, donde cerca de 4,300 habitantes viven en la periferia del área y sólo una comunidad en el interior llamada Patricia Puertas con 12 familias (MARN 2004).

Esta pequeña comunidad, no tiene ninguno de los servicios básicos, esto la coloca en un alto porcentaje de vulnerabilidad, el hecho que no cuente con sistema de agua potable ni sistemas de cañerías obliga a las personas a consumir agua de los pozos que ellos mismos construyen, aumentando el riesgo de enfermedades por la ingesta de agua contaminada (PNODT 2004).

Los métodos de desinfección por radiación solar son tecnologías que ayudan a la destrucción de los microorganismos patógenos. Entre estos métodos, la fotocatalisis heterogénea por medio de un catalizador llamado dióxido de titanio ayuda a la eliminación de bacterias por medio de su exposición al sol; esta técnica es muy importante porque permite eliminar compuestos orgánicos dañinos del agua que se utiliza para consumo.

Estudios realizados por investigadores de la Universidad de Strathclyde en Glasgow, Escocia, demuestran que la energía solar puede ser utilizada efectivamente en desinfección de agua, dado que la inactivación de los microorganismos se alcanza a altas temperaturas, o exponiéndola a radiación solar ultravioleta, especialmente cerca del rango UV (300-400nm) (Saito y El-Ghetany 2002).

La falta de investigación en El Salvador sobre esta área motivó la realización de este trabajo que es el primero en su clase y que tiene como objetivo principal contribuir con el conocimiento de nuevas técnicas de purificación de agua para ser aplicadas en comunidades donde el servicio de agua potable no existe o es de mala calidad; se espera que este aporte sea el punto de partida de investigaciones posteriores.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Aplicar la técnica de fotocátalisis heterogénea para la eliminación de *Escherichia coli* en agua de pozo para consumo humano, en la comunidad Patricia Puertas del Área Natural Protegida Colima, Municipio de Suchitoto, Departamento de Cuscatlán.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar bajo distintas concentraciones de Dióxido de Titanio la eficiencia de eliminación de *Escherichia coli* utilizando fotocátalisis heterogénea.
- Determinar la concentración de dióxido de Titanio y tiempo de exposición al sol óptimos para alcanzar la mayor eliminación de bacterias de *Escherichia coli*.
- Demostrar por medio del método de desinfección por fotocátalisis heterogénea la mejora de la calidad química y microbiológica del agua.
- Elaborar un manual que permita a los habitantes de la comunidad aplicar la metodología práctica y confiable para la desinfección de agua.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

En 1982, la OMS (Organización Mundial de la Salud) y otros organismos internacionales que velan por la salud y medio ambiente, mencionan que la buena calidad del agua y la disponibilidad de agua es una condición indispensable que condiciona la calidad de vida. Se define el agua potable como aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos en la salud (Parada 1984). Y CONACYT la define como aquella apta para el consumo humano y que cumple con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos establecidos en la norma NSO 13.07.01.08.

3.2. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA

Por el trayecto del agua pueden transmitirse muchos patógenos, los cuales tienen diferencias muy amplias en cuanto a sus características. Un método para evaluar la calidad microbiológica del agua respecto a la transmisión de enfermedades es enumerar la cantidad de organismos patógenos presentes en ella (McJundin 1992).

Una infección bacteriana en humanos depende de ciertos factores como el número de microorganismos que se necesita ingerir, de la cantidad de microorganismos que son descargados en las aguas residuales, del tiempo de supervivencia de las bacterias fuera del huésped y su resistencia a la destrucción o eliminación mediante diferentes procesos de tratamiento del agua. La detección de microorganismos como *Escherichia coli* en el agua indica el grado en el cual el agua ha sido contaminada por material fecal humano. Los microorganismos indicadores más comúnmente usados en el campo del agua son los del grupo coliforme; estudios demuestran que las características de supervivencia de los coliformes son similares a las bacterias patógenas como

Salmonella y *Shigella*, lo que permite tener o no confianza en la seguridad del agua una vez que el grupo coliforme ha sido erradicado por el tratamiento (OMS/OPS 1995).

3.3. MICROORGANISMOS PATÓGENOS MÁS COMUNES EN EL AGUA

3.3.1. *Vibrio cholerae*.

Enfermedad del Cólera provocada por la colonización del intestino delgado por parte del *Vibrio cholerae*. Correspondiente al grupo O1 que incluye 2 biotipos: el Clásico y el Tor. La evacuación de deposiciones diarreicas puede ser superior a 10 Lt por día produciendo un estado de shock profundo; síntomas: diarrea acuosa, sin dolor, vómitos ocasionales, deshidratación rápida, colapso circulatorio, hipoglucemia en niños e insuficiencia renal. Su incubación se efectúa desde pocas horas a 5 días (Andino y Lorenzana 2004).

3.3.2. *Escherichia coli*

La *Escherichia coli* está dividida por sus propiedades virulentas, pudiendo causar diarrea en humanos y otros animales. Existen cuatro variedades enterovirulentas que son: enteroinvasiva, enterotoxigénica, enteropatogénica y enterohemorrágica; los cuatro tipos se encuentran en el agua y/o alimentos contaminados (Dillert 1998).

3.3.2.1. *Escherichia coli* enterotoxigénica (ECET)

Constituye una causa importante en las enfermedades diarreicas en países en vías en desarrollo, especialmente en niños. Los síntomas son similares al cólera, especialmente en áreas donde el saneamiento es deficiente. Su incubación es de 24 horas para producir síntomas. Su transmisión se da por ingestión de agua o alimentos contaminados, leche cruda y en guarderías donde el saneamiento es deficiente (McJundin 1992).

3.3.2.2. *Escherichia coli* enteropatógena (ECEP)

Es causal de enteritis infantil, su epidemiología no está bien definida en países en desarrollo. Se conoce de brotes a través del agua (Hernández 2003).

3.3.2.3. *Escherichia coli* enteroinvasiva (ECEI)

Los serotipos que causan la enfermedad tipo *Shigella* se reconocieron desde 1967. Se sabe que es causante de epidemias transmitidas a través del agua. Se transmite a través de alimentos contaminados, el agua y los vómitos. La falta de lavado de manos y las deficiencias en la higiene personal y el saneamiento ambiental son factores que contribuyen a la propagación de la enfermedad. Se requiere de 10^6 - 10^9 organismos para que se produzca la enfermedad (McJundin 1992).

3.3.2.4. *Escherichia coli* enterohemorrágica (ECEH)

Escherichia coli O157:H7 es habitante normal de los intestinos de todos animales incluyendo los humanos, produce una verotoxina tan potente que con dosis tan bajas como 10 organismos puede causar daño, no fermenta sorbitol (Leal 2004).

3.3.3. *Salmonella* spp.

Es un género de bacterias que pertenece a la familia Enterobacteriaceae, formado por bacilos gram-negativos, anaerobios facultativos, con flagelos peritricos y que no desarrollan cápsula ni esporas.

La salmonelosis es causada por *Salmonella*, es una enfermedad de transmisión alimentaria, en especial por alimentos de origen animal y pueden aparecer en brotes en escuelas, guarderías, restaurantes y residencias de ancianos. El período de incubación es por lo general entre 12 a 36 horas, a veces hasta 6 y 48 horas (McJundin 1992).

3.3.4. *Giardia lamblia*

Es un protozoo que causa una infección en el intestino delgado llamada Giardiasis, este protozoo afecta en un porcentaje mayor a niños que adultos especialmente en niños desnutridos. Sus síntomas son diarrea crónica, heces, flatulencia, dolor abdominal, fatiga, pérdida de peso. Tiene un período de incubación de 24 horas y se transmite vía fecal-oral por agua, alimentos y mecanismos mano-boca (Parada 1984).

3.4. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA

3.4.1. PARÁMETROS FÍSICOS

3.4.1.1. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD)

Sólidos totales disueltos es el conjunto de todas las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un líquido. Es un parámetro de determinación de la calidad del agua, pues evalúa el peso total de los constituyentes minerales presentes en el agua, por unidad de volumen.

Las sustancias disueltas envuelven el carbonato, bicarbonato, clorato, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio e iones orgánicos, entre otros iones necesarios para la vida acuática. Pero, cuando presenta elevadas concentraciones, pueden ser perjudiciales.

Los sólidos disueltos están relacionados con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso. Están relacionados con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva. Una cantidad alta de sólidos disueltos cambia el sabor del agua, dándole un sabor metálico (Rawson y Hooper 2002).

3.4.1.2. TEMPERATURA

La temperatura es una variable física que influye notablemente en la calidad del agua. Afecta a características tales como la solubilidad de gases y sales, la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, desplazamientos de los equilibrios químicos, tensión superficial, desarrollo de organismos presentes en el agua, etc. La temperatura puede afectar todos los aspectos del tratamiento y suministro del agua potable.

El valor recomendado de acuerdo con la Norma Salvadoreña 13.07.01:08 es de 18-30°C. Su determinación es importante para analizar la determinación de Oxígeno Disuelto (Meierhofer y Wegelin 2003).

3.4.2. PARÁMETROS QUÍMICOS

3.4.2.1. pH

El pH (potencial de hidrógeno) es una expresión numérica que indica el grado en que el agua es ácida o alcalina. El pH de la mayoría de fuentes de agua natural, fluctúa entre 6.5 a 8.5. La concentración del ión hidrógeno puede alterarse en forma significativa cuando se le da tratamiento al agua, al igual cuando se aumenta la temperatura. Es posible determinar una relación directa entre la salud humana y el pH del agua potable, debido a que este tiene una estrecha relación con otros aspectos de la calidad del agua (OMS 1995).

3.4.2.2. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno di atómico por litro (mgO_2/l). Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica (Cárdenas 2005).

3.4.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno di atómico por litro (mgO_2/l). Aunque este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros, etc.), que también se reflejan en la medida.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica (Cárdenas 2005).

3.4.3. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.

3.4.3.1. *Escherichia coli*.

Pertenece a la familia Enterobacteriaceae; es el organismo procariota más estudiado, es una bacteria que se encuentra generalmente en los intestinos animales. Es un bacilo gram-negativo, anaeróbico facultativo, móvil por flagelos peritricos, no forma esporas, puede fermentar glucosa y lactosa; crece a un pH de 6-7 y a 37°C.

Es la principal biota del intestino, evita la colonización de bacterias patógenas produciendo una proteína inhibitoria llamada colicina, evitando que otra bacteria se una. La *Escherichia coli* está dividida por sus propiedades virulentas, pudiendo causar diarrea en humanos y otros animales.

Es indicador de contaminación fecal del agua ya que en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales, su ausencia indica que el agua es inocua (OMS/OPS 1995).

3.5. HISTORIA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA

La desinfección de las aguas se ha utilizado durante mucho tiempo. El primer filtro múltiple se desarrolló en 1685 por el físico Italiano Lu Antonio Porzo, consistía en una unidad de sedimentación (grava) y filtro de arena.

En 1746, el científico Francés Joseph Amy recibe la primera patente por el diseño de un filtro, que es utilizado en casas por primera vez en 1750. Los filtros estaban hechos de algodón, fibras de esponja y carbón. En el siglo XIX se descubrieron los efectos de los desinfectantes en el agua para el tratamiento y desinfección de la misma.

Desde 1900 los desinfectantes se utilizan extensamente por las compañías del agua para evitar la expansión de enfermedades y mejorar la calidad del agua (Lenntech 2009).

3.6. HISTORIA DE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA POR MEDIO DE RADIACIÓN SOLAR

En los años 70 los estudios del Prof. A. Acra que trabajaba en la Escuela de Salud Pública de la Universidad Americana de Beirut (Líbano), obtuvo dos resultados principales: las bacterias *Escherichia coli* sirven como indicador de los efectos de la radiación solar en las bacterias totales y que la componente de la radiación solar involucrada en la destrucción microbiana es la componente UV-A (320 - 400 nm).

Motivada por las investigaciones del Prof. Acra, un programa asociado a la Universidad de las Naciones Unidas, investiga y disemina la tecnología de desinfección de agua mediante energía solar, donde se confirmaron las experiencias del laboratorio del Prof. Acra (Franco 2004).

Los niveles de transmitancia obtenidos en dichos experimentos se pueden observar en el anexo 3, donde los gráficos que se muestran comparan la transmitancia con respecto a la longitud de onda dada en nanómetros (nm), colocando a la botella de plástico descartable en el primer lugar (Franco 2004).

3.7. MÉTODOS DE DESINFECCIÓN

3.7.1. TÉCNICA SODIS

SODIS ("SOLar water DISinfection"), significa "Desinfección Solar del Agua", es un método de desinfección, que mata a los micro-organismos dañinos para la salud humana. En 6 horas, se puede inactivar completamente concentraciones muy altas de patógenos. SODIS solo requiere de botellas de plástico y luz solar. Es un método simple, ecológico y al alcance de todos y todas (Anexo 4) (Fundación SODIS 2006).

3.7.2. RADIACIÓN SOLAR

El aprovechamiento de la radiación solar y del espectro UV, se considera de interés, siendo la existencia de una fuente de radiación UV la clave de cualquier proceso fotocatalítico mediado por TiO_2 . De toda la energía proveniente del Sol, la Tierra recibe 1.5×10^{18} kWh, por año, aproximadamente 28,000 veces el consumo mundial energético (Fox 1983).

La parte del espectro solar que puede ser utilizada en procesos fotocatalíticos con TiO_2 es reducida, pero posee una gran absorptividad en la franja UV del espectro solar; pero, como fuente de energía es barata y abundante; por lo que, aún bajo estas limitantes, es interesante utilizarla. (Rodríguez y Ziolli 2007).

En el anexo 5 podemos observar una tabla de reflectividad promedio de diferentes materiales para la realización de un concentrador solar donde se observa que el material con mayor reflectividad es el plástico metalizado para envoltura de regalos y el plástico metalizado para envoltura de alimentos. (Bandala 2005).

3.7.3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Los procesos de oxidación avanzada (POA) han sido propuestos como una alternativa para el tratamiento de aguas que contengan sustancias difícilmente biodegradables, al igual que para eliminar bacterias nocivas contenidas en el agua para el consumo humano.

Los POA pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) de potencial de oxidación (2.8 V) mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales. Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos, principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces (Sarria, Parra y Rincón 2005).

En el caso de microorganismos, estos radicales atacan la bicapa lipídica que conforma la pared externa de la célula, generando reacciones de peroxidación lipídica letales para el microorganismo. Los POA abarcan procesos como ozono/luz UV, H_2O_2 /luz UV, ultrasonido, fotocátalisis heterogénea y homogénea, y los tratamientos electroquímicos. Una de las razones que ha hecho que los POA sean objeto de un creciente interés es la posibilidad de utilizar energía solar como fuente de fotones, con el consiguiente ahorro energético y ventajas medioambientales (Sarria, Parra y Rincón 2005).

3.7.4. FOTOCATÁLISIS

Se define como una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. Durante el proceso fotocatalítico, ocurren tanto reacciones de oxidación como de reducción, por lo que no sólo se puede aplicar la fotocatalisis a la oxidación de compuestos orgánicos, sino también a la reducción de iones inorgánicos y a la reducción de otros compuestos orgánicos (Pelizzetti 1986).

Bajo la iluminación de mayores energías, los electrones de la banda de valencia pueden ser excitados a la banda de conducción creando pares electrón-hueco altamente reactivo. La foto activación se lleva a cabo con fotones de ultravioleta (UV) cercano (300-370 nm). Los radicales OH son fuertemente reactivos atacando rápidamente a moléculas orgánicas degradándolas a CO₂ y H₂O (anexo 6) (Pelizzetti 1986).

3.7.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FOTOCATÁLISIS

Existen un número de parámetros que influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso oxidación-reducción fotocatalizado y que, como consecuencia, resultan determinantes en la eficiencia global del proceso (Blanco y Malato 1996); a continuación se nombran algunos de los más importantes:

- a) **pH:** la fotocatalisis es más eficiente en medio ácido ($3 \leq \text{pH} \leq 5$).

- b) **Cinética del oxidante:** el proceso fotocatalítico es potenciado con la adición de peróxido de hidrógeno; en el sentido que la presencia de H₂O₂ acelera la mineralización con respecto al oxígeno.

- c) **Características del catalizador:** alta área superficial, una distribución de tamaño de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna.
- d) **Estructura:** Amorfa o cristalina, recibe los nombres de rutilo y anatasa.
- e) **Diámetro de partícula:** una variación del diámetro de la partícula semiconductor puede dar lugar a cambios importantes en los procesos.
- f) **Temperatura:** no se modifica la velocidad de las reacciones fotocatalíticas con la variación de la temperatura del sistema.
- g) **Intensidad de radiación:** la velocidad de reacción es proporcional a la intensidad de la luz, es decir, que a medida que aumenta la intensidad de radiación aumenta la velocidad de reacción.
- h) **Los agentes oxidantes:** son imprescindibles para la degradación del contaminante, cuanto más eficaz sea el agente oxidante para capturar huecos, mayor será la velocidad del proceso.
- i) **Tipo de reactor:** los parámetros derivados del diseño y del tipo de reactor también juegan un papel importante en el resultado final de la reacción.
- j) **Naturaleza y concentración del contaminante:** a medida que el proceso de oxidación transcurre, la cantidad de partículas de TiO_2 que estarán en reacción será menor mientras que el contaminante se descompone.

3.7.5. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea se define como la **“aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador”**, donde el catalizador activado por la absorción de luz acelera el proceso mediante la aparición de pares hueco/electrón si el catalizador es un semiconductor (Pelizzetti 1986).

En este proceso, los electrones excitados son transferidos a todo el espécimen reducible, al mismo tiempo que el catalizador acepta electrones de la especie oxidable, la cual ocupa los huecos. De esta forma, el flujo de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado (Fox 1983).

3.7.5.1. DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂)

El dióxido de titanio es un compuesto químico que es utilizado en procesos de oxidación avanzada fotocatalizada. El TiO₂ se utiliza como pigmentos y catalizadores y en la producción de materiales cerámicos. El óxido de titanio tiene gran importancia como pigmento blanco por sus propiedades de dispersión, su estabilidad química y su no toxicidad. El óxido de titanio es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial (Rodríguez y Ziolli 2007).

3.7.6. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TiO₂

Esta tecnología se basa en la utilización de un material semiconductor como catalizador, en este caso el TiO₂, el cual es activado por la luz para generar reacciones redox que pueden modificar químicamente los contaminantes, convirtiéndolos en sustancias más biodegradables, o en muchos casos logrando la completa mineralización de los mismos. El semiconductor más utilizado es la forma cristalina anatasa del dióxido de titanio (TiO₂), ya que además de ser el más activo para la fotocatalisis es un material

relativamente barato, química y biológicamente inerte y resistente a la fotodegradación (Sarria, Parra y Rincón 2005).

El mecanismo fotocatalítico más aceptado para explicar la destrucción de contaminantes orgánicos en soluciones acuosas se da al iluminar el TiO_2 con luz de longitud de onda inferior a 385 nm, un electrón de la banda de valencia se promueve hacia la banda de conducción, dejando un “hueco” positivo en la primera. Este hueco reacciona con agua o iones hidróxido, produciendo el radical $\cdot\text{OH}$, que se encarga de oxidar la materia orgánica o las bacterias presentes en el agua (Sarria, Parra y Rincón 2005).

3.8. ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli*.

El mecanismo de desinfección por UV depende de la absorción de la radiación por las proteínas, y por los ácidos nucleicos (ARN y ADN) de un microorganismo. La absorción de dosis altas de UV por las proteínas presentes en las membranas celulares lleva a la ruptura de esas membranas y, consecuentemente, a la muerte de la célula. En cambio, la absorción de dosis más bajas de UV por el ADN puede interrumpir la capacidad del microorganismo de reproducirse, impidiéndole infectar el medio. (Bolton, 1999).

El rango de la radiación UV que más afecta a los microorganismos está entre 240 y 280 nm, y se utiliza para el tratamiento de superficies contaminadas pues tienen poco poder de penetración. La radiación germicida (254 nm) es absorbido por el material celular pero de manera más significativa por los ácidos nucleicos, a los que causa el mayor daño. El principal efecto de la luz UV es causar la formación de dímeros, mediante enlaces transversales, entre pirimidinas adyacentes, especialmente residuos de timina del ADN. Estos residuos unidos por enlaces transversales, alteran el proceso normal de replicación dando como resultado mutaciones que a la larga llevan a la muerte de la bacteria por medio del rompimiento de sus estructuras (Carrillo 2003).

El método de desinfección de agua utilizando fotocátalisis heterogénea para la eliminación de microorganismos patógenos, es uno de los métodos más accesibles, rápidos y fáciles de utilizar, además de poseer un alto grado de efectividad (Rodríguez y Ziolli 2007).

3.9. NORMATIVAS

3.9.1. NORMATIVAS INTERNACIONALES

Los valores guías para la calidad bacteriológica se adaptan de la Guía para la Calidad de Agua Potable en su volumen recomendaciones, elaborada en Ginebra, Suiza. Estos valores guías nos indican que el agua no debe contener ningún microorganismo considerado patógeno. Debe estar libre de bacterias indicadoras de contaminación fecal, para asegurarse que en un abastecimiento de agua potable sean satisfactorias estas guías es importante que de manera regular se examinen muestras para detectar indicadores de contaminación fecal (OMS 1996).

El primer indicador bacteriano que se recomienda es el grupo de microorganismos coliformes; estos microorganismos no son exclusivamente de origen fecal, están presentes en el hombre y en las heces de otros animales de sangre caliente, por lo que pueden ser detectados aún después de dilución (McJundin 1992).

3.9.2. NORMATIVA SALVADOREÑA

A nivel nacional, se encuentra la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08. Agua. Agua potable (Segunda actualización). Dicha norma tiene como objetivo definir las características físicas, químicas, microbiológicas y radiactivas que debe presentar el agua para consumo humano (CONACYT 2008).

En el caso de los requisitos de calidad microbiológicos, podemos observar en el anexo 1 los valores máximos admisibles para calidad microbiológica, donde encontramos que para bacterias coliformes totales y fecales y la presencia de *Escherichia coli*, el valor máximo es de 0 UFC/ 100 ml para la técnica de filtración por membranas (CONACYT 2008).

Con respecto a los requisitos de calidad físico-químicos, podemos observar el anexo 2 donde encontramos los valores de calidad físico-químicos para agua potable, donde el pH es de 6.0-8.5, los sólidos totales disueltos son de 300-600 mg/l y la temperatura es de 18 a 30°C (CONACYT 2008).

3.10. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO POR FILTRACIÓN DE MEMBRANA

El método se basa en la filtración de un volumen conocido a través de un filtro de membrana, hecho a base de un compuesto de celulosa con un diámetro de poros de 0.45 μm ; las bacterias son retenidas en la superficie de la membrana filtrante. Cuando la membrana que contiene las bacterias se incuba en un recipiente estéril, a una temperatura apropiada con un medio de cultivo selectivo diferencial, se desarrollan colonias características de *Escherichia coli* a 37°C y fecales a 44.5°C, cuyo recuento se puede efectuar en forma directa. La metodología a ser utilizada es descrita por la American Public Health Association (APHA 2001).

3.10.1. PROCESO DE FILTRACIÓN POR MEMBRANA

La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas.

Estos procesos son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana. Las membranas se utilizan cada vez más a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi- permeables.

El número de coliformes totales presentes en el agua se determina mediante la filtración de volúmenes específicos de la muestra a través de filtros de membrana. Por lo general, están compuestos de ésteres de celulosa, típicamente con poros de 0,45 mm de diámetro que retienen los coliformes totales y otras clases de bacterias presentes en la muestra. Después se incuban las membranas vueltas hacia arriba en un medio selectivo. En la práctica, la técnica de filtración de membrana ofrece resultados comparables a los que se obtienen con el método de tubos múltiples.

Una de las ventajas del método de filtración a través de membrana es la prontitud con que pueden obtenerse los resultados y, en consecuencia, se pueden llevar a cabo rápidamente acciones. Esta técnica puede aplicarse en el análisis de casi todos los tipos de agua, también se utiliza en el análisis de leche y otros alimentos líquidos (Manual para conteo 3M).

3.10.2. DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂).

El dióxido de titanio (TiO₂) se produce industrialmente en grandes cantidades y se utilizan como pigmentos y catalizadores y en la producción de materiales cerámicos. Tiene gran importancia como pigmento blanco por sus propiedades de dispersión, su estabilidad química y su no toxicidad. El dióxido de titanio es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial.

El dióxido de titanio es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. El dióxido de titanio es anfotérico, muy estable químicamente y no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos. Sus aplicaciones abarcan todas las industrias. Sus propiedades más importantes son: su no toxicidad, su compatibilidad con las mucosas y la piel, y su buena dispersabilidad en soluciones orgánicas.

En polvo es utilizado como pigmento blanco intenso para darle brillo a productos como pintura, papel, plásticos, alimentos, medicinas, cerámica, cosméticos e incluso pastas de dientes. Sus excelentes cualidades de absorción de rayos ultravioleta lo convierten en un componente perfecto para lociones solares (INSHT 2010).

Para utilizarse como aditivo alimentario, debe cumplir las especificaciones establecidas por el JECFA (El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios). El informe “Evaluación toxicológica de algunos colorantes para alimentos, emulsificantes, estabilizadores, agentes anti-aglomerantes y algunas otras sustancias”. Los estudios bioquímicos a medio y largo plazo realizados en el hombre, muestran que no hay absorción significativa ni acumulación en tejidos tras ingerirse. Tampoco se detectaron efectos tóxicos tras la absorción de pequeñas cantidades de dióxido de titanio. Por dichos resultados, el JECFA consideró que no era necesario especificar una ingesta diaria admisible (IDA) (FAO 2010).

Algunos de los productos que utilizan TiO_2 en su elaboración se encuentran en el CODEX ALIMENTARIUS, se detalla a continuación:

- Leche en polvo y nata (crema) en polvo.
- Queso y productos análogos al queso.
- Grasas para untar.
- Helados y sorbetes.
- Licores con más de 15% de alcohol.

- Purés y preparados para untar.
- Cereales para el desayuno.
- Pastas y fideos precocidos.
- Productos de soja y de panadería.
- Productos cárnicos.
- Pescado y productos pesqueros.
- Edulcorantes de mesa.
- Aderezos, condimentos y vinagres.
- Salsas, sopas, caldos y mostazas.
- Levadura y productos análogos .
- Alimentos dietéticos y control del peso.
- Complementos alimenticios.
- Cerveza, bebidas de malta, sidras y vino.

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 los microorganismos presentes en el agua.

Cuando un semiconductor tal como el TiO_2 se pone en contacto con agua y se irradia con luz ultravioleta (UV) cercana (385 nm), después de la absorción de radiación, se generan los pares electrón/hueco, producidos en la banda de conducción y la banda de valencia respectivamente. Estas entidades participan en una serie de reacciones de oxido-reducción, principalmente con el agua, dando lugar a especies oxidantes tales como los radicales hidroxilos que son altamente activos tanto en la oxidación de sustancias orgánicas como en la desactivación o eliminación de bacterias y virus.

4. METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la comunidad Patricia Puertas ubicada dentro del ANP Colima que se encuentra en el municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán, a la altura del kilómetro 46 de la carretera troncal del norte y a dos kilómetros sobre la calle que de la hacienda Colima conduce hacia Suchitoto. Se ubica en el área de conservación Alto Lempa. Entre los 300 y los 550 msnm, entre los meridianos 89°,06' y 89°,08' y los paralelos 14°02' y 14°08'. Colinda al norte con el lago de Suchitlán y embalse del Cerrón Grande. Posee una extensión de 653.57 ha compuesta por seis porciones, su ámbito altitudinal es desde 244 msnm en el embalse del Cerrón Grande hasta los 424 msnm en el Cerro Colima (MARN 2004).

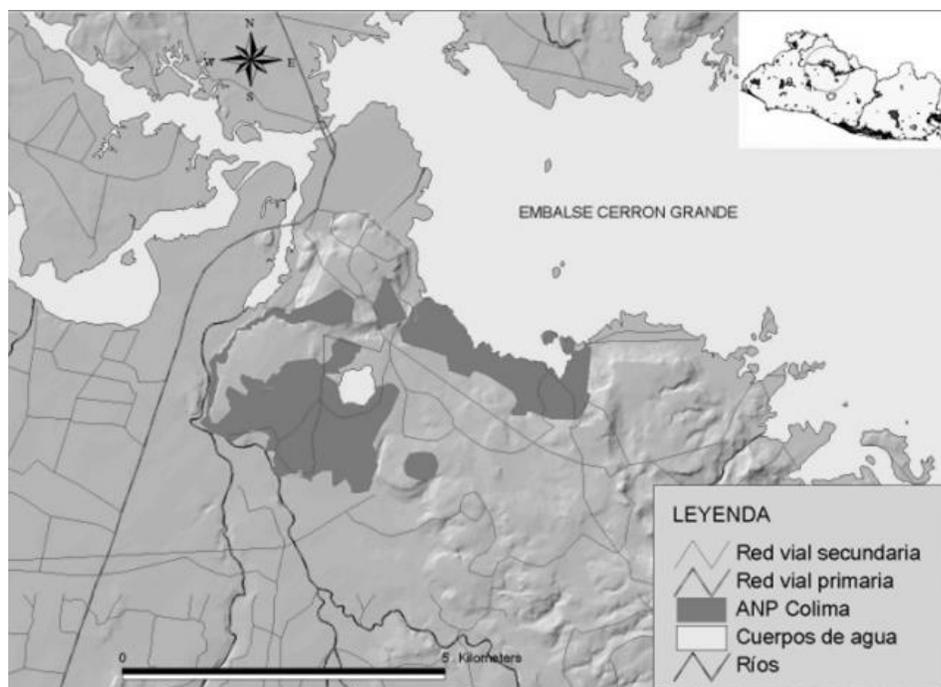


Figura 1. Ubicación Área Natural Protegida Colima. Foto MARN 2004.

4.2. FASE DE CAMPO

4.2.1. MUESTREO

El estudio se realizó con agua de pozo de la comunidad Patricia Puertas, en ella existen solamente doce pozos, de los cuales se tuvo acceso a diez de los doce antes mencionados; se tomó una muestra por cada pozo; a las cuales se les tomó parámetros físico-químicos de temperatura, pH y oxígeno disuelto (OD); luego dichas muestras se transportaron almacenados a 4°C para ser analizados en el Laboratorio de CENSALUD, donde se realizaron los correspondientes análisis microbiológicos.

Procedimiento para toma de muestras:

1. Utilizando un depósito plástico y una cuerda como se observa en la figura 2, se obtuvo 100 ml. de agua de unos de los pozos; después de extraer el agua se colocó en un recipiente plástico estéril y se realizó la medición de temperatura utilizando un termómetro digital de pinchar a prueba de agua, marca COOPER y el pH por medio de papel pH marca HYDRION; se anotaron los resultados en la hoja de toma de datos; luego se etiquetó cada frasco con datos de fecha, hora de recolección y número de pozo.

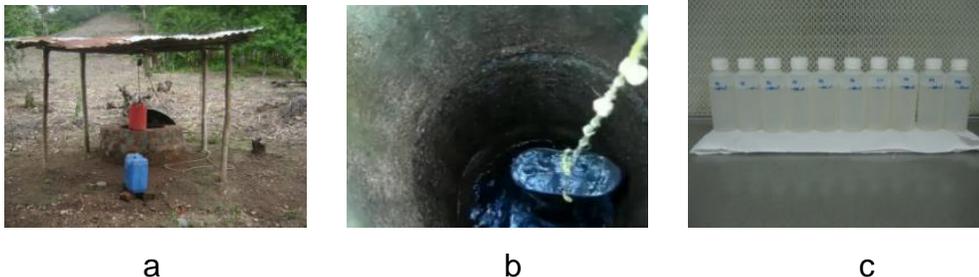


Figura 2. Toma de muestras. a) Pozo donde se realizó la toma de muestras, b) Obtención de agua, c) Muestras debidamente etiquetadas. Fotos López, G.

2. Se obtuvieron 10 muestras de 100 ml. de agua de pozo que se colocaron en una hielera y se mantuvieron a temperatura de 4°C como se observa en la figura 3, que luego se llevaron al laboratorio donde se realizaron los análisis microbiológicos (Andino y Lorenzana 2004).



Figura 3. Muestras de agua de colocadas en hielo a 4°C. Fotos López, G.

4.2.2. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A cada muestra se le midió temperatura y pH al momento de ser colectadas, dichos parámetros se midieron por medio de un termómetro digital y papel pH, como se muestran en la figura 4.

Los parámetros medidos en la muestra junto con los resultados del análisis microbiológico se compararon con la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08 para establecer el estado de la calidad del agua de la comunidad en estudio.

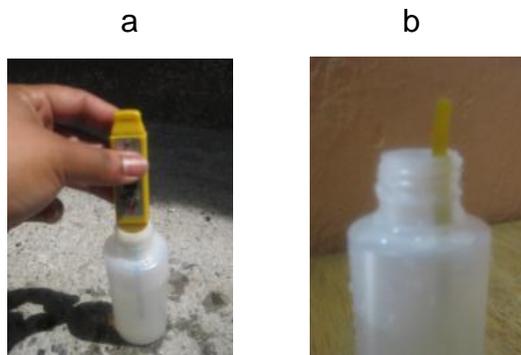


Figura 4. Toma de parámetros físico-químicos. a) Toma de temperatura, b) Medición de pH.

Fotos López, G.

4.3. FASE DE LABORATORIO

4.3.1. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Para el análisis microbiológico se utilizó el equipo de filtración por membranas en el laboratorio de CENSALUD UES (figura 5). Dicho método es una de las técnicas aprobadas por el CONACYT en la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) para agua potable 13.07.01:08; este método brinda un recuento directo y confiable de bacterias de *Escherichia coli* en una muestra de agua determinada (CONACYT 2008).



Figura 5. Equipo de filtración por membranas al vacío. Fotos López, G.

4.3.2. FABRICACIÓN DE CONCENTRADOR SOLAR

Con el propósito de aumentar la intensidad de la radiación y reducir el tiempo de exposición del agua con el catalizador dióxido de titanio (TiO_2) para la eliminación de *Escherichia coli*, se elaboró un concentrador de paredes planas con capacidad para cuatro botellas de 3 litros. Según Bandala (2005) para la fabricación del concentrador solar se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

1. Elaborar una base de 40x40 cm, toda la estructura puede ser de madera o cartón, luego cortar 4 aletas planas de 40x40 cm, pegarlas y forrar base y aletas con el material reflectivo seleccionado (figura 6).
2. Luego cortar 4 triángulos pequeños y pegarlos a la base de cada aleta, para dar inclinación de 120° a las 4 aletas.

3. Colocar 1 triángulo de cartón para dar inclinación de 20° a toda la estructura.

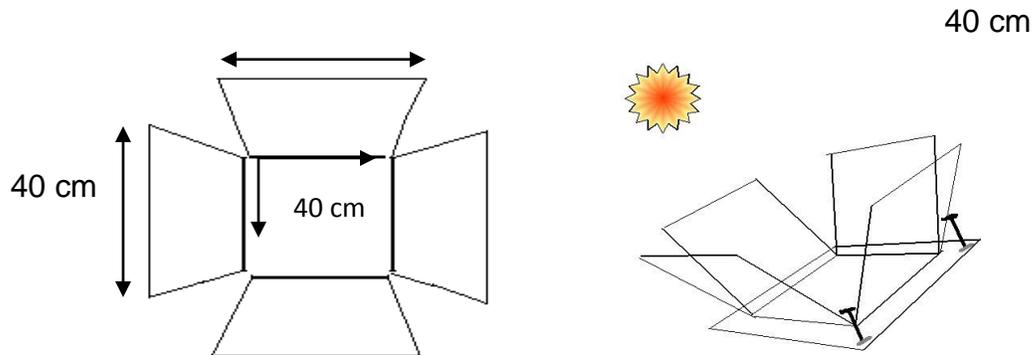


Figura 6. Esquema de concentrador solar.

4.3.3. ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli* POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

Procedimiento:

1. Una vez comparados los resultados de los parámetros físico-químicos y biológicos de las muestras obtenidas se determinó el pozo de mayor contaminación en la comunidad (figura 7) y se obtuvo una cantidad de agua de 15 lts como mínimo del pozo que presentó el nivel de contaminación más alto.



Figura 7. Pozo N°4 identificado como el pozo más contaminado. Fotos López, G.

2. Con el agua de pozo se llenaron 4 botellas de plástico PET previamente esterilizados con capacidad de 3 litros, se depositó TiO_2 en suspensión en las concentraciones de 0.5 g/L, 1g/L, 1.5 g/L y 2 g/L como se observa en la figura 8.

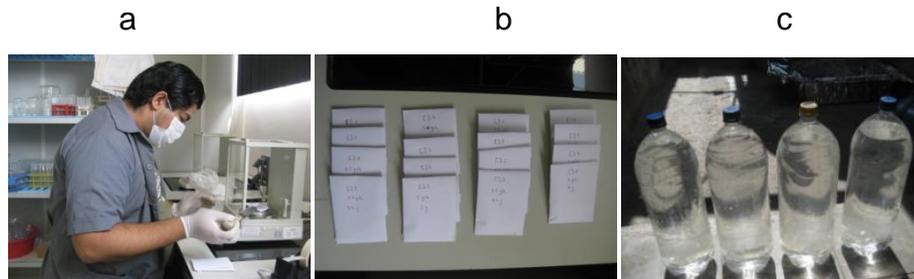


Figura 8. Pesaje y aplicación de TiO_2 . a) Pesaje de TiO_2 , b) Elaboración de sobres con TiO_2 en diferentes concentraciones, c) Botellas de plástico PET utilizadas en proceso de eliminación por fotocatalisis heterogénea. Fotos López, G.

3. Se agitaron las botellas durante 20 segundos; se taparon y colocaron en el concentrador solar con una diferencia de 10 minutos (figura 9), para tener el tiempo suficiente para tomar los parámetros físico-químicos y tomar la muestra para el análisis microbiológico; se colocó el concentrador solar en un lugar expuesto al sol a una hora específica.



Figura 9. Concentrador solar de paredes planas con botellas plásticas PET colocadas al sol. Fotos López, G.

4. Pasados 30 minutos de exposición de las botellas al sol, se realizó la medición de los parámetros físico-químicos y se tomó una muestra de 100 ml. de cada botella para realizar el análisis microbiológico por medio de la técnica de filtración de membranas (figura 10) a cada una de las 4 botellas del concentrador y se anotaron los resultados con el objetivo de observar el cambio

de dichos parámetros en la muestra a lo largo del proceso y detectar su mejoría.

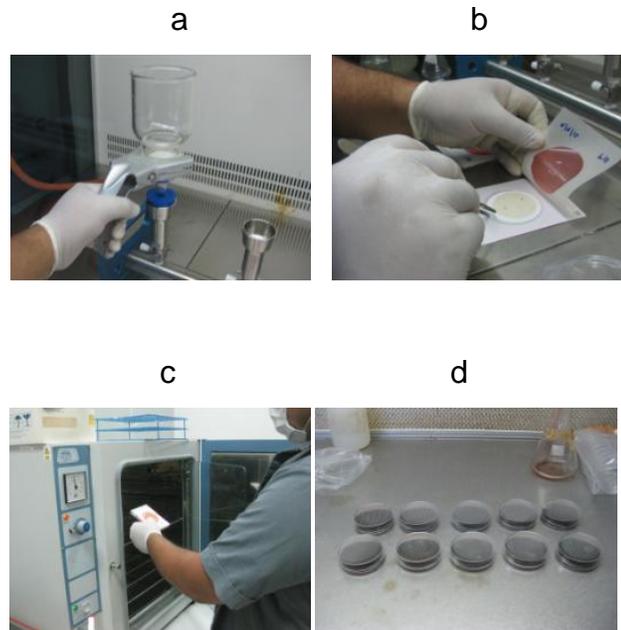


Figura 10. Proceso de filtración por membrana y análisis microbiológico. a) Proceso de filtración al vacío, b) Membrana de nitrato de celulosa en petrifilm aqua 3M, d) Incubación de 24 horas a 37°C, e) Placas petri con agar EMB para identificar presencia de *E. coli*. Fotos López, G.

4. Se repitieron los pasos anteriores, con la diferencia que las mediciones se tomaron pasados, 60 min, 90 min y 120 min. Al final, se obtuvieron las mediciones necesarias con las que se realizó el análisis estadístico (Bandala 2005).

4.3.4. DETERMINACIÓN DE CALIDAD BIOLÓGICA Y QUÍMICA DEL AGUA MEDIANTE ANÁLISIS DE DBO Y DQO.

Una vez obtenidas las mediciones, se realizó la fase de análisis e interpretación de resultados con el objetivo de determinar la concentración y tiempo óptimos de exposición para la eliminación de *Escherichia coli*, esto se determinó por medio de la comparación de los resultados obtenidos con la NSO 13.07.01:08. Al obtener la concentración y tiempo óptimos, se realizó la

determinación de calidad biológica y química del agua mediante el análisis de DBO y DQO.

El motivo por el cual el análisis de DBO y DQO se realizó en esta parte tan avanzada de la fase de laboratorio, es porque se necesitaba conocer primero la concentración y tiempo óptimos para la exposición que solo se obtuvieron después de realizada la fase de análisis e interpretación de datos.

Procedimiento:

Después de realizar el proceso de fotocátalisis heterogénea, se determinó que el tiempo y concentración óptimos son 120 minutos y 2.0 gr/Lt de TiO_2 ; la obtención de estos resultados se muestran en el análisis estadístico.

Se llenaron dos recipientes de 500 ml previamente esterilizados con agua de pozo y se colocaron en hielo a $10^{\circ}C$, luego se llenaron otros dos recipientes de 500 ml con agua de pozo pero previamente tratada por medio del proceso de eliminación de *Escherichia coli* por medio de fotocátalisis heterogénea utilizando 2 gr/Lt de TiO_2 y expuesto al sol durante 120 minutos, estos recipientes también se colocaron hielo a $10^{\circ}C$.

Los cuatro recipientes fueron llevados a los laboratorios de la Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social (FUSADES) para realizar el análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Este análisis se realizó con el propósito de determinar que el proceso de desinfección por medio de fotocátalisis heterogénea utilizando TiO_2 no solo es capaz de eliminar *Escherichia coli*, sino también otras bacterias y además de reducir la cantidad de elementos inorgánicos que se encuentran presentes en el agua.

4.3.5. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli*.

Procedimiento:

1. Se realizó el proceso de desinfección de agua de pozo por medio de la aplicación de 2.0 gr/Lt de TiO_2 y su exposición al sol durante 120 minutos a dos botellas plásticas PET de 3 litros de capacidad conteniendo agua de pozo contaminada.
2. Después del tiempo de exposición se colocaron las dos botellas en un lugar seco, a temperatura ambiente y aisladas de la luz del sol, con el objetivo que el TiO_2 no siga realizando su función catalizadora.
3. Cada día durante 8 días se realizó el análisis microbiológico por medio de la técnica de filtración de membranas utilizando placas petrifilm aqua 3M, con el objetivo de determinar la duración de la capacidad de eliminación de *Escherichia coli* del método de fotocatalisis heterogénea.

4.4. FASE DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los datos fueron analizados por medio de un diseño de experimentos aplicando un análisis bifactorial o de dos factores; se eligió este tipo de análisis, porque este es un experimento diseñado con una serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada del proceso. Además es un diseño factorial porque se busca estudiar los efectos producidos por dos o más factores (Montgomery 1993).

VARIABLES EN ESTUDIO: Temperatura, pH, Oxígeno disuelto y cantidad de colonias coliformes totales, coliformes fecales y de *Escherichia coli*.

FACTORES A MODIFICAR: concentración de TiO_2 y tiempo de exposición al sol.

Se realizaron hipótesis acerca de la igualdad de los efectos del tratamiento en las observaciones obtenidas mediante el modelo estadístico lineal: $\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$, donde los factores se dividen en factores de renglón y factores de columna.

En un diseño factorial de dos factores, tanto los factores (o tratamientos) de renglón como de columna tienen la misma importancia. Específicamente el interés consiste en probar hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de tratamiento de renglón, es decir:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \alpha_i \neq 0 \quad (\text{sea } \alpha = \text{concentración})$$

Y de la igualdad de los efectos de tratamiento de columna

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad (\text{sea } \beta = \text{tiempo})$$

También se determinó si los efectos de renglón y columna interaccionan, se comprobó:

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ para toda } i, j$$

$$H_1: \text{al menos una } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$$

Luego se realizó un análisis de varianza para el modelo bifactorial de efectos fijos, es decir de los efectos de los factores sobre las variables en estudio. También se realizó un análisis estadístico del modelo de efectos fijos por medio de una prueba de suma de cuadrados que se expresa mediante:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$

Para finalizar se realizó una comparación entre los sistemas estadísticos para ver la relación de dichos sistemas y observar los datos promedios idóneos para cada una de las variables en estudio.

Esto se realizó para la aceptación o negación de hipótesis auxiliándonos con el paquete estadístico SPSS versión 15.0. (Comunicación personal ^{1,2})

1. Ing. Oscar Lemus. Profesor catedrático Escuela de Matemática. Universidad de El Salvador.

2. Lic. Ricardo Ríos. Profesor catedrático Escuela de Matemática. Universidad de El Salvador.

5. HIPÓTESIS

En el siguiente trabajo, se planteó una hipótesis nula y una hipótesis alternativa, con el objetivo de simplificar el trabajo estadístico, con éstas hipótesis se espera cumplir con los objetivos planteados en esta investigación. Las hipótesis elaboradas son las siguientes:

H₀ : es posible mejorar la calidad del agua empleando la fotocatalisis heterogénea, acercando los valores de los parámetros medidos en la muestra a los valores observados en la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08.

H₁ : no es posible mejorar la calidad del agua empleando la fotocatalisis heterogénea, acercando los valores de los parámetros medidos en la muestra a los valores observados en la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08.

Además, en la fase de análisis e interpretación de datos, se plantearon las hipótesis estadísticas a utilizar de acuerdo al método estadístico que se aplicó.

6. RESULTADOS

6.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE LOS POZOS MUESTREADOS

En esta parte de la investigación, se realizó la medición de parámetros físico-químicos y microbiológicos de los 10 pozos muestreados que pertenecen a la comunidad Patricia Puertas, que se encuentra dentro del ANP Colima del municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán.

Los parámetros físico-químicos y microbiológicos que se tomaron fueron los siguientes:

- Parámetros físico-químicos:

Temperatura y pH.

- Parámetros microbiológicos:

Coliformes totales.

Coliformes fecales

Presencia de *Escherichia coli*.

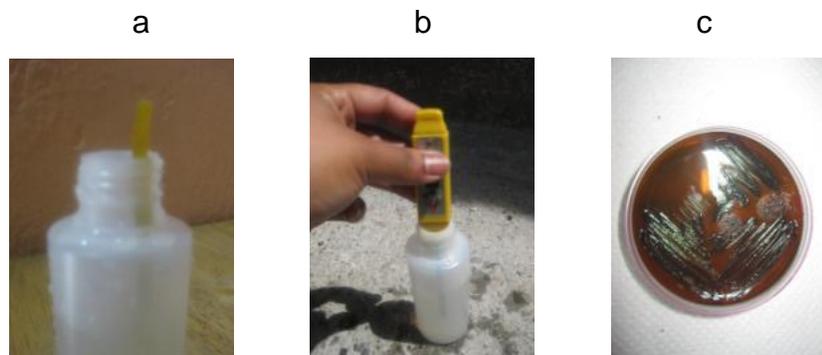


Figura 11. Parámetros físico-químicos y microbiológicos. a) Medición de pH, b) Medición de temperatura y c) Presencia de *Escherichia coli*. Fotos López, G.

Los datos obtenidos fueron registrados en una hoja de toma de datos para luego ser analizados y obtener el pozo que presentaría el nivel de contaminación más alto. Al analizar los datos, se observa que todos los

parámetros físico químicos se mantuvieron estables, es decir que en los diez pozos, los parámetros demostraron diferencias significativas; por ello, se realiza el análisis microbiológico para establecer cual pozo presenta mayor contaminación.

En el análisis microbiológico el pozo que mostró mayor contaminación fue el pozo N°4, se encontró un promedio de 35 UFC de coliformes totales y de estas, 22 UFC fueron de coliformes fecales, las cuales fueron aisladas en agar EMB y se comprobó la existencia de *Escherichia coli*, por consiguiente se determinó la contaminación del agua (figura 12).

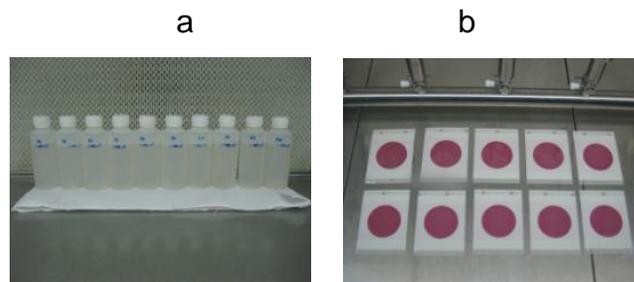


Figura 12. Muestras de los 10 pozos y placas petrifilm 3M. a) Envases con muestras de 100 ml de agua de pozo, b) Petrifilm aqua 3M para análisis microbiológico. Fotos López, G.

Como se observa en la tabla 1, la temperatura oscilaba entre los 18 y 23°C; respecto al pH, este se mostró constante con un valor de 7 en todos los pozos. La medición de UFC de coliformes fecales y totales. Los resultados obtenidos muestran valores tales como el pozo N°1 con 22 UFC siendo el valor más bajo, hasta 53 UFC de coliformes totales que mostró el pozo N°4. Las UFC de coliformes fecales mostró resultados tales como el pozo N°1 presentó 18 UFC de coliformes fecales y el pozo N° 4 presentó 48 UFC de coliformes fecales.

Los resultados de las mediciones de los parámetros físico-químicos y microbiológicos se presentan en la tabla 1.

POZO	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>Escherichia coli</i>	Temperatura T°	pH
1	22	18	positivo	18	7
2	26	24	positivo	20	7
3	19	19	positivo	18	7
4	53	48	positivo	22	7
5	42	38	positivo	19	7
6	39	35	positivo	20	7
7	25	23	positivo	20	7
8	31	26	positivo	18	7
9	29	22	positivo	19	7
10	23	20	positivo	23	7

Tabla 1. Parámetros físico-químicos y microbiológicos encontrados en pozos muestreados.

6.2. ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli* POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

Para realizar la eliminación de *Escherichia coli*, primero se elaboró un concentrador solar a partir de una caja de cartón y papel proveniente de envolturas de boquitas (churritos, papitas, etc.); se reutiliza este material por su bajo costo y porque la parte interior de estos envoltorios posee uno de los mayores índices de reflectancia.

La eliminación de *Escherichia coli* se realizó por medio de la aplicación de Dióxido de Titanio (TiO_2) en forma de polvo en botellas de plástico PET de 3 litros de capacidad, en la cuales se colocó agua proveniente del pozo más contaminado según el muestreo realizado y una solo con agua como control, dichas botellas se colocaron en el concentrador solar para la aplicación del método de desinfección.

El método de desinfección consistió en colocar a cada una de las botellas una cantidad de Dióxido de Titanio (TiO_2) en diferentes concentraciones, con el objetivo de encontrar la concentración de TiO_2 que mayor cantidad de *Escherichia coli* elimina.

Cada una de las botellas se taparon, agitaron y colocaron en el concentrador solar con una diferencia de 10 minutos y se expusieron al sol por 30 minutos como se muestra en la figura 13, pasado este tiempo se tomó una muestra de 100 ml a cada una para luego realizar el análisis microbiológico que determinaría la capacidad de eliminación del método empleado (Tabla 2).

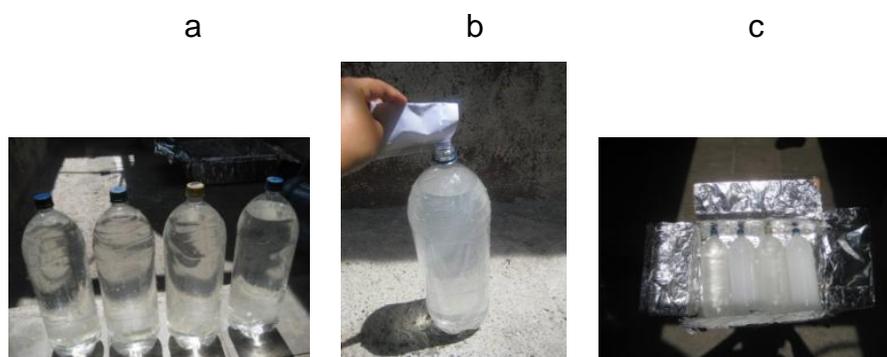


Figura 13. Proceso de fotocatalisis heterogénea. a) Botellas PET con 3 lts de agua de pozo, b) aplicación de TiO_2 en suspensión, c) botellas en concentrador solar de paredes planas. Fotos López, G.

Este método se repitió, pero se expusieron las botellas en el concentrador solar de paredes planas durante 60, 90 y 120 minutos. Pasado el tiempo de exposición, se tomó de cada botella una muestra de 100 ml para realizar su respectivo análisis microbiológico y los resultados fueron registrados (tablas 2, 3, 4 y 5).

30 MINUTOS DE EXPOSICIÓN			
[] TiO₂	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>E. coli</i>
0.5 gr/Lt	47	44	positivo
1.0 gr/Lt	42	39	positivo
1.5 gr/Lt	37	33	positivo
2.0 gr/Lt	31	27	positivo

Tabla 2. Eliminación de *E. coli* pasados 30 minutos de exposición.

60 MINUTOS DE EXPOSICIÓN			
[] TiO₂	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>E. coli</i>
0.5 gr/Lt	36	33	Positivo
1.0 gr/Lt	31	27	Positivo
1.5 gr/Lt	23	19	Positivo
2.0 gr/Lt	18	15	Positivo

Tabla 3. Eliminación de *E. coli* pasados 60 minutos de exposición.

90 MINUTOS DE EXPOSICIÓN			
[] TiO ₂	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>E. coli</i>
0.5 gr/Lt	21	18	positivo
1.0 gr/Lt	17	13	positivo
1.5 gr/Lt	11	9	positivo
2.0 gr/Lt	6	6	positivo

Tabla 4. Eliminación de *E. coli* pasados 90 minutos de exposición.

120 MINUTOS DE EXPOSICIÓN			
[] TiO ₂	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>E. coli</i>
0.5 gr/Lt	10	7	positivo
1.0 gr/Lt	6	4	positivo
1.5 gr/Lt	3	2	positivo
2.0 gr/Lt	0	0	negativo

Tabla 5. Eliminación de *E. coli* pasados 120 minutos de exposición.

6.3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli*.

Se realizó el proceso de eliminación por fotocatalisis heterogénea utilizando Dióxido de Titanio (TiO₂) y colocando las botellas en el concentrador solar por un tiempo de 120 minutos y una concentración de 2.0 gr/L; luego se colocaron en un lugar oscuro y al mismo tiempo se tomó la muestra respectiva para realizar el análisis microbiológico (Anexo 11); este procedimiento se realizó durante 8 días, los resultados se observan en la tabla 6.

DÍA	UFC Coliformes totales UFC/100 ml	UFC Coliformes fecales UFC/100 ml	Presencia <i>Escherichia coli</i>	Temperatura T°	pH
1	0	0	negativo	28	7
2	0	0	negativo	22	7
3	0	0	negativo	20	7
4	0	0	negativo	20	7
5	0	0	negativo	19	7
6	0	0	negativo	19	7
7	0	0	negativo	20	7
8	0	0	negativo	19	7

Tabla 6. Resultados de pruebas microbiológicas y parámetros físico-químicos de la determinación de eliminación de *Escherichia coli* con TiO₂ durante un período de ocho días.

Tras el estudio continuo de las muestras, luego de la aplicación del tratamiento se confirma la efectividad de eliminación, porque en el transcurso de ocho días después de realizar la medición de parámetros físico-químicos y análisis microbiológicos no se observó la presencia de *Escherichia coli*.

7. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.

Los datos obtenidos fueron registrados en una hoja de toma de datos (tabla 1) para luego ser analizados y obtener por medio de dichos datos el pozo que presentaría el nivel de contaminación más alto. El análisis de las muestras inicia con el estudio de las mediciones para los parámetros físico químicos, el cual se muestra a continuación.

7.1 ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA EN LOS DIEZ POZOS DE MUESTREO

Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Temperatura	10	18	23	19.70	1.703
N válido (según lista)	10				

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para la temperatura.

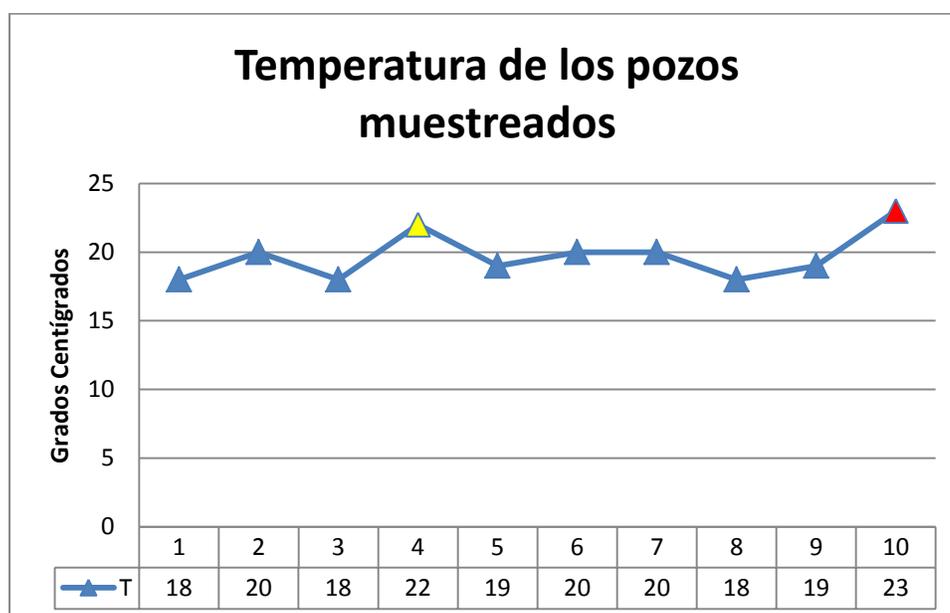


Gráfico 1. Temperatura de los pozos muestreados.

En el caso de la temperatura fue posible observar (tabla 7) que existe una diferencia de 5°C entre la temperatura más baja y la más alta, este es un parámetro que presenta poca variabilidad. Además es posible determinar que los pozos que presentan las temperaturas más altas son los pozos 4 y 10, con temperaturas de 22° y 23° respectivamente ubicándose por encima de la media del grupo (gráfico 1).

7.2. ANÁLISIS DEL pH EN LOS DIEZ PUNTOS DE MUESTREO

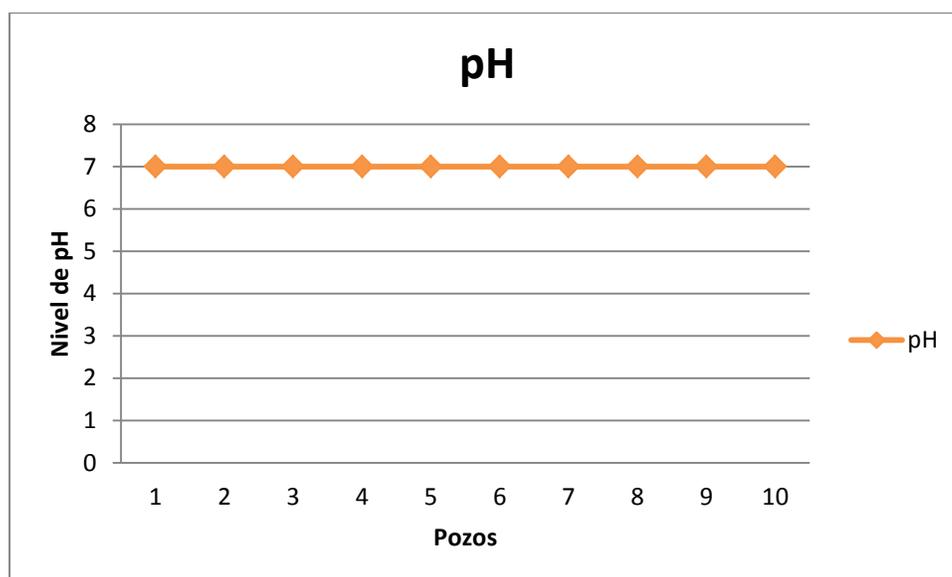


Gráfico 2. Medición de pH de los 10 pozos muestreados.

En el caso del pH es posible observar que este posee un valor constante; al analizar los datos obtenidos en el muestreo de los pozos, se pudo observar que todos los parámetros físico-químicos (temperatura y pH) se mantuvieron estables (gráfico 2); por ello, se hizo uso del análisis microbiológico para establecer el pozo que poseía mayor contaminación.

7.3. ANÁLISIS DE UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS.

El estudio de los resultados para la cantidad de Unidades formadoras de colonias encontradas en el análisis de laboratorio, se muestran en el gráfico 3:

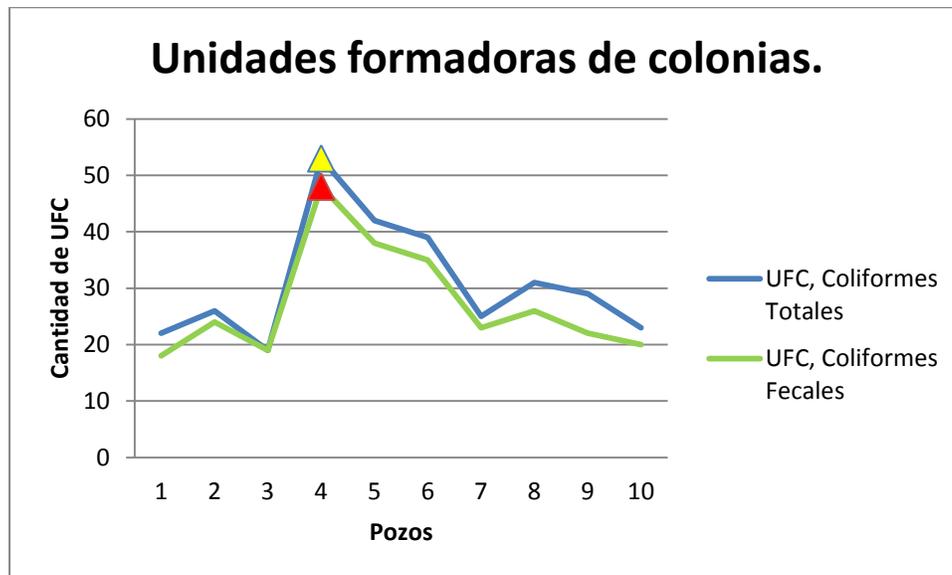


Gráfico 3. Medición de Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

En el gráfico 3 se puede observar que existen un punto que sobresale de los demás, hay 53 unidades formadoras de colonias de coliformes totales, de las cuales 48 son UFC de coliformes fecales, esto da como resultado el pozo 4 como el pozo más contaminado.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
UFC_CT	10	19.00	53.00	30.9000	10.66094
UFC_CF	10	18	48	27.30	9.832
Temperatura	10	18	23	19.70	1.703
N válido (según lista)	10				

Tabla 8. Estadísticos descriptivos para Unidades Formadoras de Colonia.

En la tabla 8 se observan los estadísticos descriptivos que son los valores mínimos y máximos para las variables coliformes totales y fecales,

también se observa la media y la desviación típica; en estas cuatro mediciones se encuentran valores más altos para las coliformes fecales y al observar la desviación típica esta refleja mayor variabilidad para esta variable, es decir la cantidad e UFC para coliformes totales es más inestable.

En el análisis microbiológico, se realizó el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) de coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* y se demostró que el pozo 4 es donde se observa mayor número de UFC y presencia de *Escherichia coli*.

Para demostrar la presencia de *Escherichia coli* se tomaron muestras de las placas petrifilm aqua 3M y se aislaron en agar EMB, se incubaron por un período de 24 horas a una temperatura de 37°C y se comprobó la existencia de *Escherichia coli* por medio de la coloración verde metálico característico.

7.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO DE ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli* POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

Se estudian las tablas de doble entrada para la cantidad de coliformes totales y coliformes fecales de manera separada, teniendo como columnas los tiempos de exposición y como renglones las concentraciones de Dióxido de titanio. Específicamente se debe probar la hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de tratamiento de renglón, es decir:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \alpha_i \neq 0 \quad (\text{sea } \alpha = \text{concentración})$$

Y de la igualdad de los efectos de tratamiento de columna

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad (\text{sea } \beta = \text{tiempo})$$

UFC Coliformes Totales					
[] de TiO_2 / tiempo de exposición	30	60	190	120	Totales por fila
0.5	47	42	37	31	157
1.0	36	31	23	18	108
1.5	21	17	11	6	55
2.0	10	6	3	0	19
Totales por columna	114	96	74	55	

Tabla 9. Tabla de contingencia Concentración – Tiempo para UFC Coliformes totales.

UFC para Coliformes Fecales					
Tiempo de exposición / [] TiO_2	30	60	90	120	Totales por fila
0.5	44	39	33	27	143
1.0	33	27	19	15	94
1.5	18	13	9	6	46
2.0	7	4	2	0	13
Totales por columna	102	83	63	48	

Tabla 10. Tabla de contingencia Concentración – Tiempo para UFC Coliformes fecales.

En la tabla 8 y 9 se encuentra la concentración de TiO_2 en las filas, y en las columnas el tiempo, los totales por fila presentan un decrecimiento más rápido que los totales por columna, es decir que la cantidad de UFC decrecen más rápidos mientras se exponen a una concentración mayor y no tanto debido al tiempo de exposición.

En ambas tablas, es posible notar que la eficiencia del método se manifiesta en el cruce entre el tiempo más prolongado y la concentración más alta, pues es en dicho cruce donde se elimina por completo las UFC luego del tratamiento, lo que significa que el concentración de TiO_2 está altamente relacionado con el tiempo de exposición al sol.

7.5. ANOVA PARA COLIFORMES FECALES RESPECTO AL TIEMPO

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2416.500	3	805.500	20.765	.687
Intra-grupos	465.500	12	38.792		
Total	2882.000	15			

Tabla 11. Análisis de varianza para Coliformes Fecales respecto al tiempo.

Después de realizar el análisis de varianza se obtuvo como resultado un nivel de significancia mayor de 5% ó 0.05 (tabla 11), esto significa que se puede rechazar la hipótesis nula estadística, es decir que las medias aritméticas de los subgrupos de acuerdo al tiempo de exposición son diferentes.

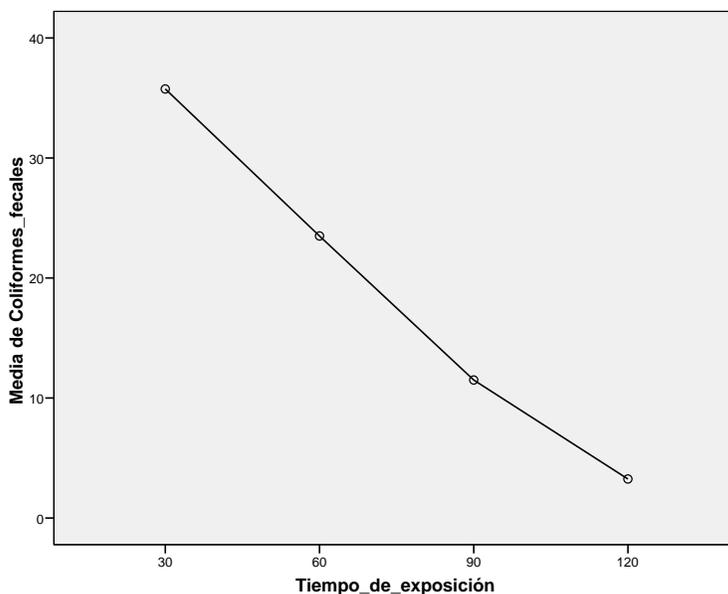


Gráfico 4. Medias aritméticas de las UFC de acuerdo al tiempo.

Es posible observar que el promedio de coliformes fecales en la muestra disminuye a medida que incrementa el tiempo (gráfico 4) por lo que podemos afirmar que entre estas dos mediciones existe una relación inversamente proporcional y que además el tiempo es un factor que influye en la eliminación de la bacteria en estudio.

Se realizará el mismo análisis pero ahora dando respuesta a la hipótesis del efecto de la concentración

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \alpha_i \neq 0 \quad (\text{sea } \alpha = \text{concentración})$$

7.6. ANOVA PARA COLIFORMES FECALES DE ACUERDO A LA CONCENTRACIÓN DE TiO₂.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	415.500	3	138.500	.674	.584
Intra-grupos	2466.500	12	205.542		
Total	2882.000	15			

Tabla 12. Análisis de varianza para Coliformes Fecales de acuerdo a la concentración.

Nuevamente se utilizó un nivel de significancia máximo admisible del 5% y dado que el nivel obtenido para la prueba es de $0.584 > 0.05$ (tabla 12) es posible rechazar la hipótesis nula estadística y es posible afirmar que si existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de acuerdo a la concentración a la que son expuestas las muestras en estudio.

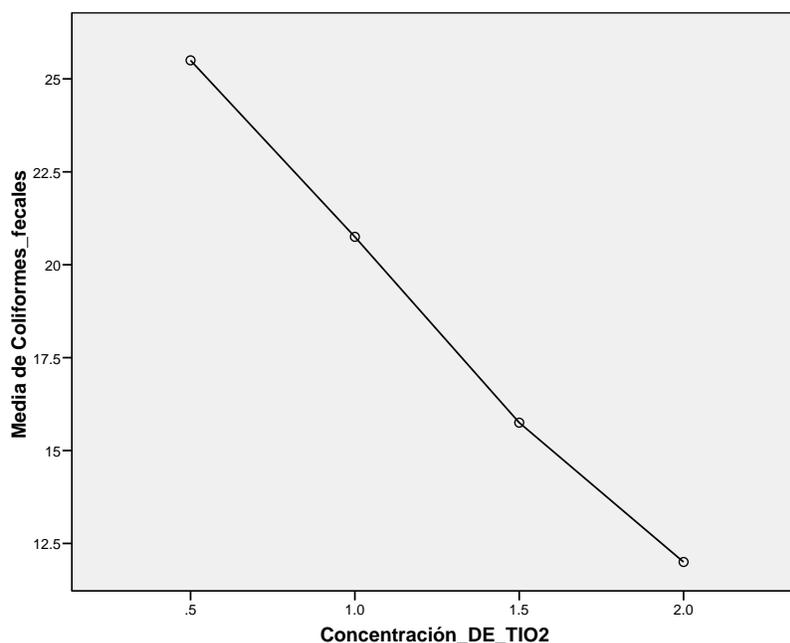


Gráfico 5. Medias aritméticas de las UFC de acuerdo a la concentración.

Al igual que en el caso del factor tiempo es posible observar que la cantidad de coliformes fecales disminuye a medida que aumenta la concentración de dióxido de titanio por lo que este par de variables se relacionan de manera inversa (gráfico 5). Hasta este momento ha sido posible determinar que ambos efectos por separados se relacionan con la cantidad de coliformes fecales presentes en la muestra, es decir que cada uno de ellos por separado contribuye a la eliminación de dicha bacteria.

7.7. ANÁLISIS DEL CRUCE ENTRE LA VARIABLES TIEMPO DE EXPOSICIÓN Y CONCENTRACIÓN DE TiO₂.

En la tabla 13 se observa el comportamiento de la cantidad de unidades formadoras de colonias para coliformes fecales debido al efecto de la interacción entre el tiempo de exposición y la concentración de TiO₂ a la que fueron expuestas las muestras

Tiempo de exposición	Concentración de TiO ₂	Media
30	.5	47.000
	1.0	42.000
	1.5	37.000
	2.0	31.000
60	.5	36.000
	1.0	31.000
	1.5	23.000
	2.0	18.000
90	.5	21.000
	1.0	17.000
	1.5	11.000
	2.0	6.000
120	.5	10.000
	1.0	6.000
	1.5	3.000
	2.0	0.000

Tabla 13. Comportamiento de UFC de coliformes fecales según interacción entre tiempo de exposición y concentración de TiO₂.

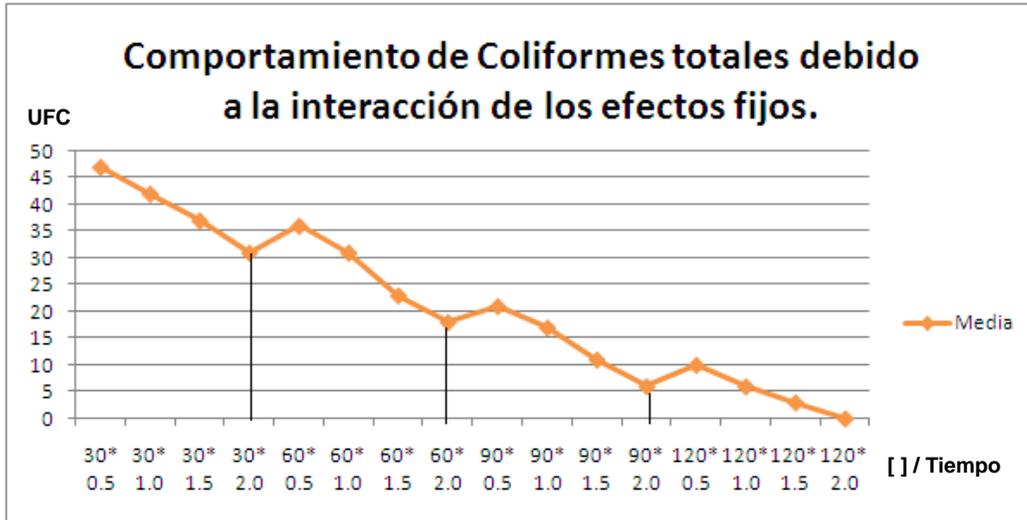


Gráfico 6. Comportamiento de UFC de coliformes fecales según interacción entre tiempo y concentración de TiO₂.

Es posible observar en el gráfico 6 que los efectos en estudio interactúan entre sí es decir ambos contribuyen a la eliminación de *Escherichia coli*, se relacionan inversamente con la cantidad de bacterias presentes en la muestra y además ambos optimizan su efecto en los valores más altos de sus respectivas escalas.

Es decir la combinación más efectiva es la que se observa en el tiempo de exposición más prolongado y a la concentración de TiO₂ más alta por lo que el cruce entre ambas variables vuelve efectivo el método permitiendo una eliminación total de *Escherichia coli*.

Con esta evidencia, la hipótesis de investigación no puede ser rechazada y se puede afirmar la hipótesis nula que dice es posible mejorar la calidad del agua empleando la fotocatalisis heterogénea, acercando los valores de los parámetros medidos en la muestra a los valores observados en la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.07.01:08.

7.8. ELABORACIÓN DE UN MANUAL.

La metodología empleada tiene como objetivo principal ser llevada a la práctica, específicamente para ser utilizada en comunidades donde el servicio de agua potable no existe o donde dicho servicio es de mala calidad.

Para que este proceso sea más fácil de comprender por todas las personas que utilicen dicho proceso de desinfección, se elaboró un manual donde se detalla paso a paso los procesos de elaboración de un concentrador solar y el proceso de desinfección de agua por medio de fotocatalisis heterogénea utilizando TiO_2 . El manual se muestra en la figura 14.

a



b

Tabla de contenido	
INTRODUCCIÓN	3
ELABORACION DE CONCENTRADOR SOLAR.....	4
Materiales:.....	4
Procedimiento:.....	5
PROCESO DE DESINFECCION DE AGUA POR MEDIO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA UTILIZANDO TiO_2	6
Materiales:.....	6
Procedimiento:.....	7
BIBLIOGRAFÍA.....	8

c

INTRODUCCION

Las metodologías tradicionales de tratamiento de aguas son extraordinariamente caras, por lo que se hace necesario el desarrollo de tecnologías simples, eficientes y de bajo costo para la eliminación in situ de estas sustancias (Litter y Mansilla 2003).

Los problemas relacionados con la calidad del agua en El Salvador son muy complejos y a pesar de contar con un marco relativamente amplio de instrumentos regulatorios para enfrentar la contaminación del agua ha experimentado una tendencia creciente de casos de enfermedades de origen hídrico, afectando principalmente a la población infantil.

Las comunidades que no tienen ninguno de los servicios básicos las coloca en un alto porcentaje de vulnerabilidad, el hecho que no cuente con sistema de agua potable obliga a las personas a consumir agua contaminada, aumentando el riesgo de enfermedades.

Estudios realizados demuestran que la energía solar puede ser utilizada efectivamente en desinfección de agua, dado que la inactivación de los microorganismos se alcanza a altas temperaturas, o exponiéndola a radiación solar ultravioleta.

d

ELABORACION DE CONCENTRADOR SOLAR

Materiales:



1 caja de cartón de 40 cm² aprox.



Envoltorios de boquitas.



Tirro o cinta adhesiva



1 cuña de madera o cartón de 2.5 cm. de altura.

e

Procedimiento:

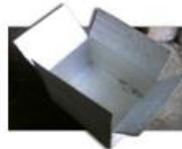


Forrar el interior la caja con los envoltorios de boquitas, la parte de color gris que reflejará la luz tiene que estar hacia afuera. Utilizar la cinta adhesiva para fijar los envoltorios a la caja y para fijar la cuña a uno de los lados de la caja.

f

PROCESO DE DESINFECCION DE AGUA POR MEDIO DE FOTOCATALISIS HETEROGÉNEA UTILIZANDO TiO₂

Materiales:



Concentrador solar



4 botellas plásticas PET transparentes de soda o jugo de 3 litros de capacidad



6 gr de TiO₂ por cada botella

g



h

BIBLIOGRAFÍA

- Bandala, E. 2005. Desinfección de agua por fotocátalisis solar. Memorias del XVIII Congreso Nacional de Hidráulica. Monterrey. Nuevo León. México. 45-50 pp.
- Fundación SODIS. 2006. SODIS (en línea). España. Consultado 11/08/2010. Disponible en <http://www.fundacionsodis.org/es/sodis02.php>
- Litter, M. y Mansilla, H. 2003. Desinfección solar de aguas en comunidades rurales de América Latina. Proyecto OEA AE 141/2001. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo.

Figura 14. Manual para la elaboración de un concentrador solar y proceso de desinfección de agua por medio de fotocátalisis heterogénea utilizando TiO_2 . a) Portada, b) Índice, c) Introducción, d) Materiales para elaborar un concentrador solar, e) Procedimiento para elaborar un concentrador solar, f) Materiales para el proceso de desinfección de agua, g) Procedimiento para el proceso de desinfección de agua, h) Bibliografía.

8. DISCUSIÓN

- En el año 2004, Andino y Lorenzana realizan una aplicación del método de desinfección solar conocido como SODIS, en el caserío Cerro Partido del departamento de Chalatenango, dicho trabajo se basó en la aplicación del método SODIS para desinfectar agua a nivel doméstico, donde el principal resultado que obtuvieron fue la inactivación de *Escherichia coli* durante un período de ocho horas, pasado ese tiempo, la bacteria vuelve a su estado natural. En comparación al trabajo presentado, se obtuvo no solo la inactivación sino también la eliminación por completo de la bacteria, permitiendo que se mantenga inocua por un período de ocho días, un período mucho mayor que el obtenido por Andino y Lorenzana.
- En el año 2005, Sarria, Parra y Rincón, en Colombia probaron nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida, utilizando TiO_2 como catalizador, uno de sus principales descubrimientos fue que los contaminantes químicos en el agua se convierten en sustancias más biodegradables. Este estudio se basó en la disminución de contaminantes inorgánicos, ya que todo el estudio se realizó con aguas residuales provenientes de empresas textiles, a diferencia del presente trabajo, se realizó utilizando agua de pozo para consumo humano y como principal indicador de contaminación se utilizó la bacteria *Escherichia coli*, el proceso utilizado demostró que se puede eliminar dicha bacteria, y junto a los resultados obtenidos por los autores colombianos, podría demostrar que por medio del proceso de fotocatalisis heterogénea utilizando TiO_2 como catalizador, se puede mejorar la calidad tanto microbiológica como química del agua.

- Los resultados obtenidos demuestran que la eliminación de *Escherichia coli* sucede cuando la absorción de rayos UV se encuentran entre los 285 a 340 nm, estos resultados coinciden con los obtenidos por parte de Pelizzetti en el año de 1986, en Italia y Hernández en el año 2003 en la ciudad de Veracruz, México; ambos realizaron un proceso fotocatalítico en aguas residuales utilizando TiO_2 como catalizador, ambos demostraron que por medio del proceso de fotocátalisis es posible eliminar las bacterias que se encuentran en el agua, ya que Pelizzetti basó su investigación en coliformes totales y Hernández basó su investigación en *Vibrio cholerae* y ambos obtuvieron resultados muy parecidos a los del presente trabajo que difiere de los antes mencionados porque se utilizó a *Escherichia coli* como indicador de contaminación y a la vez su ausencia como indicador de desinfección de agua.
- La eficiencia de la desinfección solar en la remoción de contaminantes microbiológicos bajo radiación solar y el uso de un concentrador solar, se puso en evidencia de manera similar en el caso de Bandala que en el año 2005, realizó en México una validación en laboratorio; esta validación logró analizar la influencia de la radiación solar sobre los microorganismos en diferentes tiempos de exposición y en diferentes grados de concentración del catalizador TiO_2 . Esta validación se diferencia con el presente trabajo, ya que Bandala si utilizó *Escherichia coli* como indicador de contaminación pero la utilizó de manera controlada realizando diferentes diluciones de agua destilada conteniendo diferentes concentraciones de *Escherichia coli* y lámparas UV de 1000 nm de longitud de onda; el presente trabajo se diferencia porque se utilizó una agua de pozo para consumo humano que contiene una cantidad de bacterias al natural, es decir que no se controla por medio de diluciones. Además esto permite que los experimentos se realicen en un medio ambiente real, natural y no de manera teórica.

También en lugar de lámpara UV, se utilizó luz solar, lo que permite que el experimento se practique no solo en el laboratorio, sino en lugares donde el método necesita ser aplicado.

- Leal en el año 2004 realizó en México un estudio de desinfección de agua por fotocátalisis heterogénea y Rincón en el año 2003 en Estados Unidos realizó un experimento de inactivación fotocatalítica de *Escherichia coli* por medio de TiO_2 ; dichos estudios se diferencian porque ambos utilizaron agua destilada y el TiO_2 fijado Leal lo fijó a anillos de borosilacato y Rincón lo fijó a varas de vidrio, al mismo tiempo ambos realizaron sus experimentos con lámparas de luz ultravioleta con una intensidad entre los 700 y 1000 nm. El presente trabajo se diferencia de los antes mencionados porque el TiO_2 se utilizó en suspensión obteniendo resultados muy satisfactorios, además el uso del catalizador en suspensión y demás materiales para realizar el proceso de desinfección demuestra ser más efectivo, no solo porque se logra el objetivo de desinfectar el agua eliminando *Escherichia coli*, sino también la reutilización de materiales biodegradables, permitiendo ser utilizado por personas de escasos recursos.

9. CONCLUSIONES

- En los ensayos expuestos a radiación solar el proceso de fotocátalisis fue responsable de la eliminación total y sin recrecimiento del microorganismo indicador, *Escherichia coli*.
- Existe una dependencia absoluta de la eliminación de *Escherichia coli* con la radiación ultravioleta, porque la presencia de la radiación permite que se realice el proceso de fotocátalisis y que la eliminación se lleva a cabo.
- El catalizador TiO₂ evaluado muestra una actividad bactericida altamente eficiente, ya que de todas la investigaciones que se realizaron a nivel internacional, la presente es la única que muestra una cantidad mínima del catalizador, obteniendo la mayor eficiencia del catalizador.
- De acuerdo con las investigaciones realizadas, a mayor concentración se tiene una probabilidad mayor de eliminación.
- El catalizador TiO₂ desempeña una función importante en el mecanismo de desinfección fotocatalítica, ya que su presencia incrementa el nivel de desinfección y su bajo costo permite implementar la técnica en zonas de escasos recursos en países en desarrollo.
- La eliminación completa de *Escherichia coli* se da a los 120 minutos de exposición y aplicando una concentración de 2.0 g/L.

10. RECOMENDACIONES

- La utilización de UV y TiO_2 son procesos que deberían ser considerados como una alternativa para la descomposición de varios compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Realizar más estudios de la capacidad de eliminación del TiO_2 en suspensión sobre otros microorganismos patógenos que se encuentran en aguas contaminadas.
- Elaborar estudios donde se analice la capacidad de descontaminación del catalizador TiO_2 y el uso de luz UV en diferentes niveles de agua contaminada, no solo con microorganismos patógenos, sino también con partículas inorgánicas contaminantes.
- Ejecutar estudios para determinar la concentración de dióxido de titanio máxima tolerable para la eliminación de microorganismos dañinos para el ser humano que se encuentran en agua para consumo humano.
- Mediante los estudios de laboratorio que se realizaron, ha sido posible determinar la efectividad del método de fotocátalisis heterogénea, por lo que se recomienda su uso, ya que como ventaja adicional este posee un bajo costo.
- Es necesario la realización de pruebas con el fin de determinar el tiempo de exposición y la concentración del catalizador en una escala óptima para que pueda ser aplicado en agua con diferentes niveles de contaminación.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Andino, JC y Lorenzana, CV. 2004. Aplicación del método de desinfección solar (SODIS) del agua utilizada a nivel doméstico en el caserío Cerro Partido, Chalatenango. Facultad de Química y Farmacia. Universidad de El Salvador. (Trabajo de graduación para optar al grado de Licenciado en Química y Farmacia). 114 pp.

- APHA (American Public Health Association). 2001. Compendium of methods for the microbiological examination of foods. 4ª edición. Washington, Estados Unidos. 676 pp.

- Bandala, E. 2005. Desinfección de agua por fotocátalisis solar. Memorias del XVIII Congreso Nacional de Hidráulica. Monterrey. Nuevo León. México. 45-50 pp.

- Blanco, J. y Malato, S. 1996. Tecnología de fotocátalisis solar: utilización de la radiación solar para el tratamiento de contaminantes industriales. Instituto de estudios Almerienses de la Diputación de Almería. España.

- Bolton, JR. 1999. Light compendium-ultraviolet: principles and applications. USEPA. Newsletter, n. 66, p. 9-37.

- Cárdenas, JA. 2005. Demanda biológica de oxígeno. Colombia. Consultado 13/08/2010. Disponible en http://atenea.udistrital.edu.co/grupos/fluoreciencia/capitulos_fluoreciencia/calaguas_cap 17 y 18.pdf

- Carrillo, L. 2003. Microbiología agrícola. Editorial Universidad Nacional de Salta. Salta. Argentina. 160 pp.

- CONACYT (Centro Nacional de Ciencia y Tecnología). 2008. Norma salvadoreña. Agua. Agua potable (segunda actualización) (en línea). El Salvador. Consultado 7/10/2010. Disponible en <http://www.infoq.org.sv/dbnormas/NSO%2013.07.01.08.pdf>

- Dillert, R. 1998. Photocatalytic Disinfection of Municipal Wastewater. Chemical Engineering & Technology. Volumen 21. 356 p.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Norma general del codex para los aditivos alimentarios. CODEX-STAN 192-1995. Food and Agriculture Organization. 265 p.

- Fox, M. 1983. Organic heterogeneous photocatalysis: Chemical conversions sensitized by irradiated semiconductors. Acc. Chem. Res, 16. 314-321 p.

- Franco, J. 2004. Desinfección solar de agua. Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO). Universidad de Salta. Salta, Argentina. 11 pp.

- Fujishima, A. y Honda, K. 1972. Chemical Reviews. Volume 72. American Chemical Society. Estados Unidos. 37-38 p.

- Fundación SODIS. 2006. SODIS (en línea). España. Consultado 11/08/2010. Disponible en <http://www.fundacionsodis.org/es/sodis02.php>

- Garrido, C. 2000. Crescimento e absorção de nutrientes pelo algodoeiro e pela mamoneira adubados com gliricídia e esterco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 13, #5. 541 p.

- Hernández, I. 2003. Tratamiento fotocatalítico de aguas residuales utilizando TiO_2 como catalizador. Veracruz. México. 20 pp.

- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). 2007. Ficha internacional química del dióxido de titanio. España.

- Leal, M. 2004. Desinfección de agua por fotocátalisis heterogénea. Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. México. 17 pp.

- Lenntech. 2009. Historia de la desinfección del agua (en línea). Amsterdam, Holanda. Consultado 15/08/2010. Disponible en <http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-desinfeccion-agua.htm>

- Litter, M. y Mansilla, H. 2003. Desinfección solar de aguas en comunidades rurales de América Latina. Proyecto OEA AE 141/2001. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo.

- López, A.; Restrepo, N.; De La Cruz, W. et al. 2011. Llegó la escasez y mandó a parar: Estudio de Caso. En estudios gerenciales, Vol. 27 No. 119. p. 235-254. Disponible en <http://hdl.handle.net/10906/5602>

- Malato, S. 1999. Solar photocatalytic decomposition of pentachlorophenol dissolved in water. CIEMAT.

- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2004. Plan de manejo ANP Colima. El Salvador. 131 pp.

- McJundin, E. 1992. Agua y Salud Humana. 4ta. Edición. Editorial Limusa, Noriega editores. Organización Panamericana de la Salud.

- Meierhofer, R y Wegelin, M. 2003. Guía de aplicación: Desinfección solar del agua. Indeart S. A. de C. V. Lima, Perú. 90 pp.

- Montgomery, DC. 1993. Diseño y análisis de experimentos. Programas educativos S.A. de C.V. México. 1-11, 177-190 p.

- OMS (Organización Mundial de la Salud) /OPS (Organización Panamericana de la Salud). 1995. Guías para la Calidad del Agua Potable. V. 2, p. 3-6, 293-294. V. 3, p. 5, 119.

- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1995. Guías para la Calidad del Agua Potable. 2ª Ed. V. 1, p. 55. V. 3, p. 63, 69- 70, 85.

- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1996. Guidelines for Drinking-Water Quality. Ginebra.

- Parada, ME. 1984. Estudio preliminar de la contaminación de la Costa del Puerto de Acajutla y su complejo Industrial. Facultad de Química y Farmacia. Universidad de El Salvador. (Trabajo de Graduación para optar al grado de Licenciado en Química y Farmacia).

- Pelizzetti, E. 1986. Homogeneous and heterogeneous photocatalysis. La chimica e l'industria. Promedia Publishing Via B. de Rolandi. Milán. Italia.

- PNODT (Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial). 2004. Plan Especial de Protección del Medio Físico y Natural y Catálogo de Espacios Naturales. El Salvador. 185 p.

- Rawson y Hooper. 2002. Parámetros físico-químicos: sólidos disueltos totales (en línea). Puerto Rico. Consultado 12/08/2010. Disponible en <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-tds.pdf>

- Rincón, A. 2003. Interaction between *E. coli* inactivation and DBP-precursors – dihydroxybenzene isomers– in the photocatalytic process of drinking-water disinfection with TiO₂. Estados Unidos. 263 p.

- Rodríguez, C. y Zioli, RG. 2007. Inactivation of *Escherichia coli* in water by TiO₂-assisted disinfection using solar light. Volume 18. #1. Sociedade Brasileira de Química. Brazil. 126-134 p.

- Saito, TS. y El-Ghetany, H. 2002. The Inactivation of Microbes by Sunlight: Solar Disinfection as a Water Treatment Process. Advances in Applied Microbiology. Reino Unido. 261 p.

- Sarria, VM; Parra, S y Rincón, G. 2005. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. Revista Colombiana de Química. Volumen 34. #2. Colombia.

- Tosa, K. e Hirata, T. 1999. UV Inactivation, Liquid-Holding Recovery, and Photo reactivation of *Escherichia coli* O157 and Other Pathogenic *Escherichia coli* Strains in Water. Journal of Food Protection. Volume 63. 361 p.

12. ANEXOS

Anexo 1. Valores Máximos Admisibles para Calidad Microbiológica

Parámetro	Valor máximo admisible		
	Técnica		
	Filtración por membranas	Tubos múltiples	Placa vertida
Bacterias coliformes totales	0 UFC/100 ml	< 1.1 NMP/100 ml	-
Bacterias coliformes fecales o termo tolerantes	0 UFC/100 ml	< 1.1 NMP/100 ml	-
<i>Escherichia coli</i>	0 UFC/100 ml	< 1.1 NMP/100 ml	-
Conteo de bacterias heterótrofas, aerobias y mesófilas	100 UFC/100 ml máx.	-	100 UFC/ml
Organismos patógenos	Ausencia		

Fuente. Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 2008.

Anexo 2. Valores de calidad físico-químicos para agua potable.

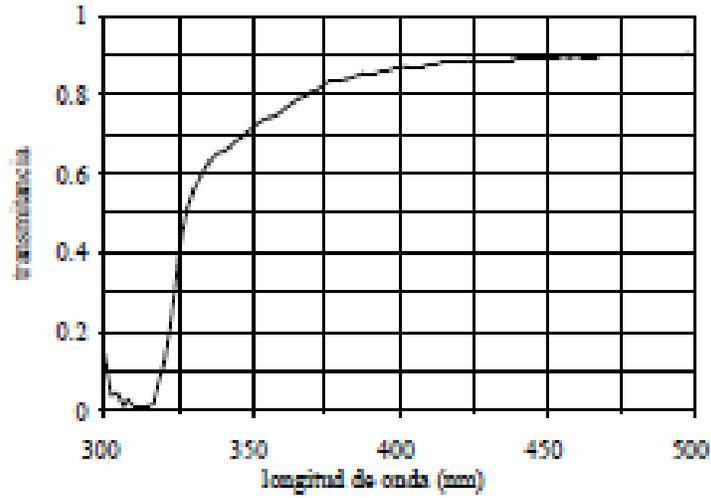
Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible
Color verdadero	mg/l (Pt-Co)	15
Olor	# de umbral de olor	No rechazable
pH	-	8,5
Sabor	# umbral de sabor	No rechazable
Sólidos totales disueltos	mg/l	1000
Temperatura	°C	18 – 30° C
Turbidez	UNT	5

Fuente. Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 2008.

Anexo 3. Niveles de transmitancia de distintos tipos de botellas.

Transmitancia de Coca Cola descartable

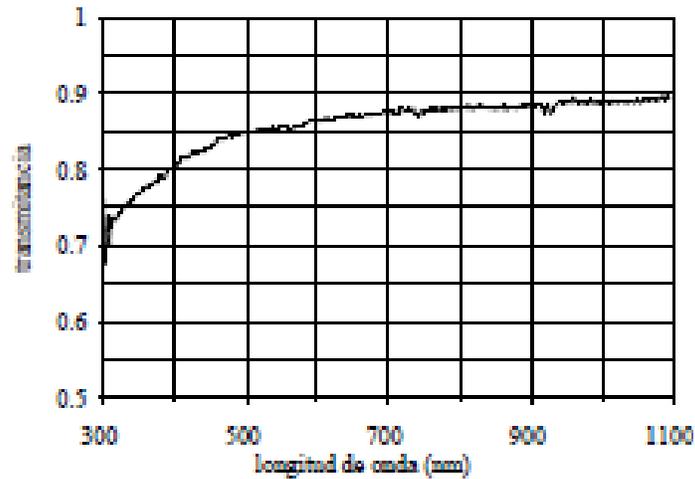
A



Fuente. Desinfección solar de agua. Franco 2004.

Transmitancia de la bolsa de plástico

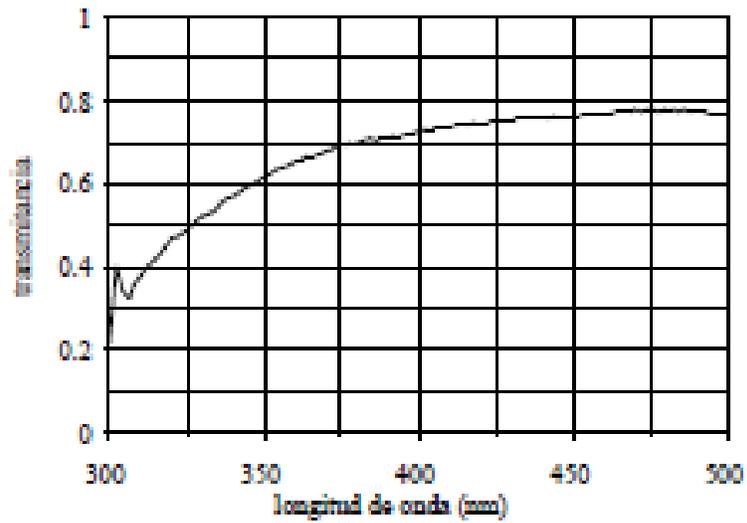
B



Fuente. Desinfección solar de agua. Franco 2004.

Transmitancia botella descartable azul

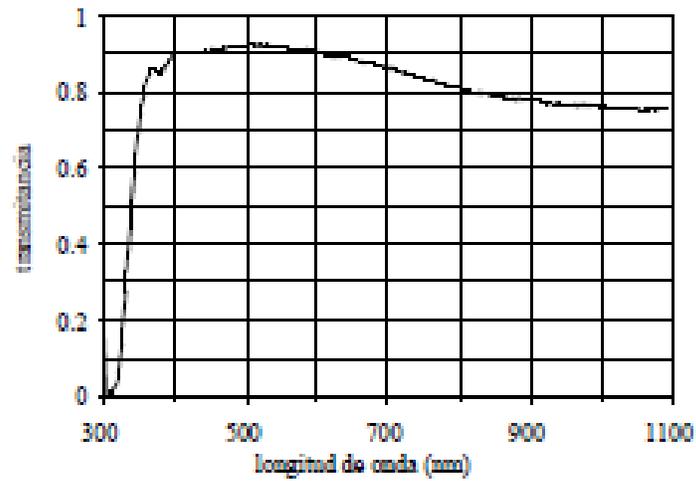
C



Fuente. Desinfección solar de agua. Franco 2004.

Transmitancia del vidrio común

D



Fuente. Desinfección solar de agua. Franco 2004.

Anexo 4. Método SODIS



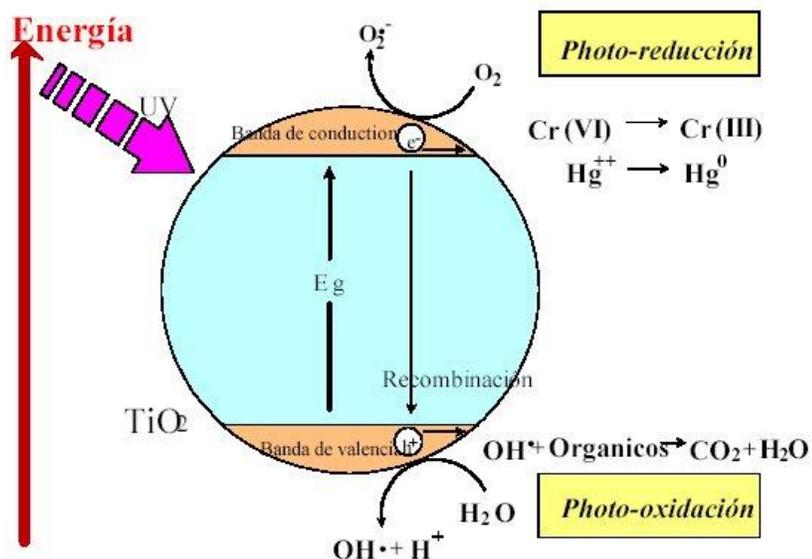
Fuente. Fundación SODIS 2006.

Anexo 5. Reflectividad promedio de diferentes materiales.

Material	200-700 nm	300-540 nm
Plástico metalizado (envoltura de regalos)	68.8 – 79.3	66.0 – 75.2
Plástico aluminizado (envoltura de papas fritas)	25.8 – 69.9	25.3 – 68.7
Cinta 100% aluminio autoadherible	68.4	57.66
Papel aluminio (para uso en cocina)	41.6 – 56.4	38.8 – 56.3
Lámina de aluminio	16.6 – 19.1	14.8 – 16.3
Lámina galvanizada	28.98	31.6

Fuente. Desinfección de agua por fotocatalisis solar. Bandala 2005.

Anexo 6. Proceso fotocatalítico de una partícula de TiO₂.



Fuente. Homogeneous and heterogeneous photocatalysis. Pelizzetti 1986.

Anexo 7. Procedimiento para realizar análisis microbiológico en placas petrifilm aqua 3M.



Hidratación de placa petrifilm 3M. Fotos López, G.



Armado de aparato de filtración al vacío y preparación de membrana.

Fotos López, G.



Colocación de membrana y muestra y filtrado al vacío. Fotos López, G.



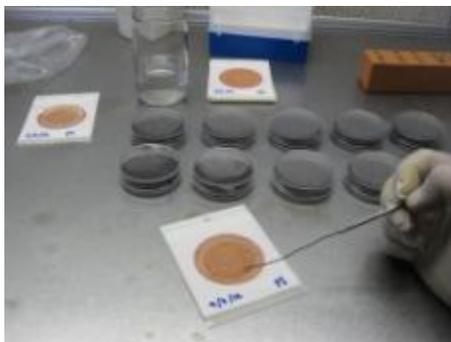
Aplicación de membrana en placa petrifilm aqua 3M y eliminación de burbujas de aire. Fotos López, G.



Incubación por 24 horas a 37°C. Fotos López, G.



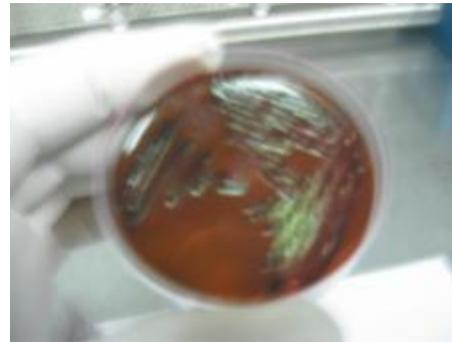
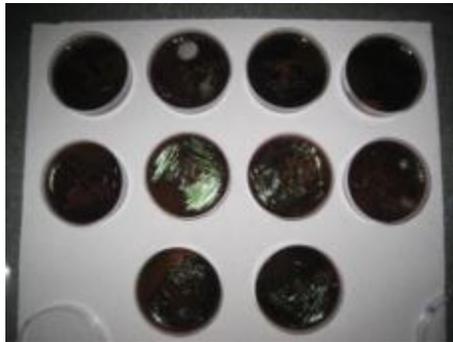
Conteo de colonias y elaboración de agar EMB para identificación positiva de *Escherichia coli*.
Fotos López, G.



Inoculación de placas petri con agar EMB para identificación positiva de *Escherichia coli*. Fotos López, G.



Incubación de placas petri con agar EMB por 24 horas a 37°C. Fotos López, G.



Identificación positiva de *Escherichia coli* por medio de brillo verde metálico característico. Fotos López, G.

13. LISTADO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.

APHA: American Public Health Association

CIE: Centro de Investigación en Energía.

FAO: Food and Agriculture Organization.

IDA: Ingesta Diaria Admisible.

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

JECFA: Joint Expert Committee on Food Additives.

NSO: Norma Salvadoreña Obligatoria.

OD: Oxígeno Disuelto.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

PH: Potencial de Hidrógeno.

PNODT: Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial.

SODIS: Solar Disinfection.

STD: Sólidos Totales Disueltos.

TiO₂: Dióxido de Titanio.

UFC: Unidades Formadoras de Colonias.

UNAM: Universidad Autónoma de México

14. GLOSARIO

- **Absortividad:** la medida de la cantidad de luz absorbida por una solución, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración por unidad de longitud de la trayectoria de luz.
- **Aditivos:** es toda sustancia que, sin constituir por sí misma un alimento ni poseer valor nutritivo, se agrega intencionadamente a los alimentos y bebidas en cantidades mínimas con objetivo de modificar sus caracteres organolépticos o facilitar o mejorar su proceso de elaboración o conservación
- **Aerobios:** organismos que necesitan del oxígeno para vivir o poder desarrollarse.
- **Aguas residuales:** tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales.
- **Anaerobios:** organismo que no utilizan oxígeno en su metabolismo.
- **Anfotérico:** que puede reaccionar ya sea como un ácido o como una base.
- **Borosilacato:** material componente de vidrios que se emplean extensamente en instrumentos ópticos por sus buenas propiedades ópticas, pero también mecánicas (baja dilatación).
- **Cefalea:** dolores y molestias localizadas en cualquier parte de la cabeza.
- **Enfermedades endémicas:** enfermedades infecciosas que afectan de forma permanente, o en determinados períodos a una región.
- **Enterobacterias:** familia de bacterias Gram negativas que contiene más de 30 géneros y 100 especies que pueden tener morfología de bacilos o cocos.
- **Espectro solar visible:** energía que es irradiada por una fuente luminosa, que viene ordenada por unos valores de longitud de onda que son visibles al ojo humano.
- **Fotocatálisis:** reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato.
- **Fotoquímica:** es el estudio de las interacciones entre átomos, moléculas pequeñas, y la luz.

- **Giardiasis:** enfermedad diarreica ocasionada por la *Giardia intestinalis*, conocido como *Giardia lamblia*.
- **Inactivación:** supresión del efecto tóxico de un germen o una toxina.
- **Nanopartículas:** partícula microscópica con por lo menos una dimensión menor que 100 nm.
- **Oxidación biológica:** reacciones de transferencia de hidrógenos o electrones de unas moléculas a otras en las células vivas, para la producción de energía.
- **Oxígeno disuelto:** es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua.
- **Patógeno:** que produce enfermedad.
- **Pirimidina:** compuesto orgánico, similar al benceno, y a la piridina pero con un anillo heterocíclico.
- **Potencial de hidrógeno:** medida de la acidez o alcalinidad de una solución; indica la concentración de iones hidronio en determinadas sustancias.
- **Procesos avanzados de oxidación:** procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes.
- **Reacciones redox:** reacción en la que uno de los compuestos se reduce y el otro se oxida, ocurren cambios en los números de oxidación de los átomos de algunas de las sustancias involucradas.
- **Sólidos totales disueltos:** expresión para el contenido combinado de todos los compuestos inorgánicos y orgánicos contenidos en una sustancia líquida.
- **Timina:** compuesto heterocíclico derivado de la Pirimidina; es una de las cinco bases nitrogenadas constituyentes de los ácidos nucleicos y forman parte del ADN y se representa con la letra T.
- **Verotoxina:** toxina proteica parecida a la toxina de Shiga (*Shigella*) e inhibe la síntesis proteica.