

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**



**“DESCONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA DE AGUAS TIPO
ORDINARIO, POR MEDIO DEL PROCESO FOTOCATALÍTICO EN EL
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA, EL SALVADOR”.**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

**BANIA ELIZABETH LINARES RIVAS.
ANA MARÍA MÉNDEZ CASTANEDA.**

PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADA EN BIOLOGÍA

**DOCENTE DIRECTOR
LIC. OSCAR ARMANDO GUERRA ASCENCIO.**

**COORDINADOR GENERAL DEL PROCESO DE GRADO
MSc. RICARDO FIGUEROA CERNA.**

ABRIL 2006.

SANTA ANA. EL SALVADOR. C.A.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**



**“DESCONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA DE AGUAS TIPO
ORDINARIO, POR MEDIO DEL PROCESO FOTOCATALÍTICO EN EL
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA, EL SALVADOR”.**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

**BANIA ELIZABETH LINARES RIVAS.
ANA MARÍA MÉNDEZ CASTANEDA.**

**PARA OPTAR AL GRADO DE
LICENCIADA EN BIOLOGÍA**

**DOCENTE DIRECTOR
LIC. OSCAR ARMANDO GUERRA ASCENCIO**

**COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADO
MSc. RICARDO FIGUEROA CERNA**

ABRIL 2006.

SANTA ANA. EL SALVADOR. C.A.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**



**“DESCONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA DE AGUAS TIPO
ORDINARIO, POR MEDIO DEL PROCESO FOTOCATALÍTICO EN EL
DEPARTAMENTO DE SANTA ANA, EL SALVADOR”.**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR
BANIA ELIZABETH LINARES RIVAS.
ANA MARÍA MÉNDEZ CASTANEDA.**

**PARA OPTAR AL GRADO DE
LICENCIADA EN BIOLOGÍA**

**COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADO DEL
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA:**

MSc. RICARDO FIGUEROA CERNA

F. _____

DOCENTE DIRECTOR: LIC. OSCAR ARMANDO GUERRA ASCENCIO

F. _____

ABRIL 2006.

SANTA ANA. EL SALVADOR. C.A.

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA:

DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ.

SECRETARIA GENERAL:

LICDA. ALICIA MARGARITA RIVAS DE RECINOS.

FISCAL:

LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA.

AUTORIDADES DE LA FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LIC. JORGE MAURICIO RIVERA.

VICE-DECANO:

LIC. ROBERTO GUTIÉRREZ AYALA.

SECRETARIO:

LIC. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA.

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA:

MSc. RICARDO FIGUEROA CERNA.

ABRIL 2006.

SANTA ANA. EL SALVADOR. C.A.

DEDICATORIA

Acto que dedico a:

A DIOS TODO PODEROSO Y MARIA SANTISIMA: Por darme las fuerzas necesarias e iluminar mi camino y estar siempre con migo para lograr el éxito de mis objetivos

A MIS PADRES: Miguel angel Méndez Sánchez y Ana Julia Castaneda de Méndez. Por el infinito amor, esfuerzos y sacrificios que han hecho para llegar a culminar mi carrera.

A MIS HERMANOS: Por el amor fraternal, apoyo y comprensión en los momentos difíciles de mi vida.

A MI COMPAÑERA DE TESIS: Por su amistad y comprensión que me ha tenido durante todo el periodo del trabajo de grado.

A LOS DOCENTES DEL DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA: Por su enseñanza y comprensión.

A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR: Por abrirme las puertas para formarme un profesional.

Ana María Méndez Castaneda

DEDICATORIA

A DIOS TODO PODEROSO: por iluminar mí camino y darme la sabiduría necesaria para culminar con éxito mis propósitos.

A MIS PADRES: Mario Antonio Linares Barahona y Clementina Rivas Farfán, quienes me han dado todo su amor, comprensión y con muchos esfuerzos me ayudaron a culminar mi carrera.

A MI ESPOSO: Álvaro Stanley Velásquez Gonzáles por su comprensión, apoyo, infinito amor y sobre todo su tolerancia.

A MI HIJO: Alessandro Stanley Velásquez Linares por ser mi fuente de inspiración, y por darme las fuerzas necesarias para finalizar mi trabajo de grado.

A MI HERMANO: Carlos Mauricio Rivas por su apoyo en todo momento.

A LOS DOCENTES DEL DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA: Por su enseñanza y comprensión.

A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR: Por abrirme las puertas para formarme académicamente.

ACTO QUE DEDICO A LA MEMORIA DE MI HERMANO: Mario Leonel Linares Rivas, quien vive en los corazones de todos los que lo queremos y recordamos su bondad y amor.

Bania Elizabeth Linares de Velásquez

AGRADECIMIENTOS

AL ASESOR DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACION: Lic. Oscar Armando Guerra Ascencio, por el tiempo dedicado a la revisión y orientación de este trabajo.

AL LIC. JUAN ARNOLDO AMAYA: Por su orientación y tiempo dedicado en la realización del trabajo.

AL LIC. RICARDO FIGUEROA CERNA: Por permitirnos usar las instalaciones y materiales del laboratorio de la universidad, su enfoque siempre en pro del estudiante.

AL LIC. RAFAEL REYES MIRA MARTINEZ: Por ayudarnos a desarrollar el trabajo de laboratorio, sus orientaciones y atenciones fueron de gran importancia y nos permitieron culminar con éxito nuestro propósito.

A TODOS LOS AMIGOS(AS): Que de una u otra forma colaboraron en la realización de este estudio.

A LA FACULTAD MULTIDICLINARIA DE OCCIDENTE, DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA: Por formarnos académicamente y darnos las bases teórico - científicas para realizar este trabajo.

Bania Elizabeth Linares de Velásquez
Ana María Méndez Castaneda.

ÍNDICE GENERAL

PÁG.	
	RESUMEN.....xv
1.	INTRODUCCIÓN.....1
2.	REVISION BIBLIOGRÁFICA.....2
2.1.	IMPORTANCIA DEL AGUA Y SU CONTAMINACIÓN.....2
2.2.	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....3
2.3.	PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADOS.....6
2.4.	DETOXIFICACIÓN SOLAR.....8
2.5.	SEMICONDUCTORES MÁS UTILIZADOS.....10
2.6.	EFFECTO BACTERICIDA DEL PROCESO FOTOCATALÍTICO.....14
2.7.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FOTOCATÁLISIS.....16
2.8.	APLICACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS.....18
3.	METODOLOGÍA.....21
3.1.	TRABAJO DE CAMPO.....21
3.1.1.	FASE I.....21
3.1.2.	FASE II.....21
3.2.	TRABAJO DE LABORATORIO.....23
3.2.1.	DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE TRABAJO.....23
3.2.2.	FASE I. PREPARACIÓN DE MEDIOS DE CULTIVO.....23
3.2.3.	DESINFECCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.....24
3.2.4.	ESTERILIZACIÓN DE MATERIALES.....24
3.2.5.	AISLAMIENTO DE LA CEPA DE <i>E. COLI</i>24
3.2.6.	FASE II. APLICACIÓN DEL MÉTODO FOTOCATALITICO A CULTIVOS PUROS DE <i>E. COLI</i>24

3.2.7. FASE III. APLICACIÓN DEL MÉTODO FOTOCATALÍTICO A LAS MUESTRAS DE AGUA OBTENIDAS DE LAS PLANTAS.....	25
3.3. ANALISIS ESTADÍSTICO.....	26
4. RESULTADOS.....	27
5. DISCUSIÓN.....	36
6. RECOMENDACIONES.....	39
7. CONCLUSIONES.....	41
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
9. ANEXOS.....	47

LISTA DE CUADROS

CUADRO	PÁG.
1. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.025 % de TiO ₂ anatasa (oxidante).....	27
2. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.05 % de TiO ₂ anatasa (oxidante).....	27
3. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.1 % de TiO ₂ anatasa (oxidante).....	28
4. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 1.0 % de TiO ₂ anatasa (oxidante).....	28
5. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 5.0 % de TiO ₂ anatasa (oxidante).....	29
6. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico.....	29

7. Resultado del proceso fotocatalítico a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.025 % de TiO ₂ rutilo (oxidante).....	30
8. Resultado del proceso fotocatalítico a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.05 % de TiO ₂ rutilo (oxidante).....	30
9. Resultado del proceso fotocatalítico a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 0.1 % de TiO ₂ rutilo (oxidante).....	31
10. Resultado del proceso fotocatalítico a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 1.0 % de TiO ₂ rutilo (oxidante).....	31
11. Resultado del proceso fotocatalítico a un cultivo de <i>E. coli</i> a 0.1 % con una concentración de 5.0 % de TiO ₂ rutilo (oxidante).....	31
12. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico.....	32
13. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Real a una concentración de 1.0%.....	32
14. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Obrera 26 de enero a una concentración de 1.0%.....	33
15. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Santa Ana Norte a una concentración de 1.0%.....	33

16. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta Ciudad Real, utilizando TiO_2 (anatasa) a una concentración de % en ausencia de luz solar y con agitación.....34
17. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta Ciudad Real, utilizando TiO_2 (anatasa) a una concentración de % en presencia de luz solar y sin agitación.....34
18. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico.....35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
1. Tratamiento de aguas residuales.....	4
2. Planta de detoxificación solar.....	6
3. Proceso de degradación solar fotocatalítica.....	9
4. Reacción fotoinducida redox sobre la superficie del TiO ₂	12
5. Estructuras cristalinas del TiO ₂ anatasa y rutilo.....	13
6. Desinfección y descontaminación simultánea mediante Fotocatálisis.....	17

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	PÁG.
1- Infraestructura de la planta de tratamiento Ciudad Real.....	47
2- Infraestructura de la planta de tratamiento Santa Ana Norte.....	48
3- Infraestructura de la planta de tratamiento Ciudad Obrera 26 de enero.....	49
4- Toma de muestras de agua.....	50
5- Aislamiento de la cepa de <i>E. coli</i>	51
6- Muestra sometida al tratamiento fotocatalítico.....	52
7- Siembra de muestras posteriores al proceso fotocatalítico.....	53
8- Cultivos posteriores al tratamiento fotocatalítico, a diferentes tiempos y concentraciones de TiO ₂	54
9- Cultivos posteriores al tratamiento fotocatalítico, después de 24 horas de incubación.....	55

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue descontaminar microbiológicamente, aguas de tipo ordinario a través del proceso fotocatalítico, utilizando como agente oxidante o semiconductor TiO_2 en la forma cristalográfica anatasa, el parámetro a medir es la presencia o no de la bacteria *E. coli*, la cual suele encontrarse en el tracto intestinal del ser humano y otros animales de sangre caliente y que con excepciones se encuentra fuera del intestino, cuando ha ocurrido contaminación con excretas humanas o de animales homeotérmicos, sus colonias son planas no viscosas.

El trabajo de campo se dividió en Fase I y II; la primera se realizó en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, Facultad multidisciplinaria de occidente en la cual se tomó una muestra del Servicio Sanitario del departamento de Biología para aislar una Cepa de *E. coli*.

La fase de campo II consistió, en visitar y recolectar las muestras en diferentes ocasiones de las plantas de tratamiento siguientes: Santa Ana Norte, Ciudad Real, y Ciudad Obrera 26 de enero.

El trabajo de laboratorio se dividió en Fase I, II y III la primera consistió en el aislamiento de la cepa de *E. coli*. En la fase II se aplicó el proceso fotocatalítico a un cultivos puros de *E. coli*. Utilizando los dos tipos de forma cristalográfica del TiO_2 más conocidos rutilo y anatasa; en diferentes concentraciones y tiempos con el fin de conocer su efecto y establecer la concentración que fuera más efectiva y económicamente más viable, después de aplicar los análisis estadísticos se determinó que esta era 1.0% de TiO_2 y la forma más fotoreactiva resultó ser anatasa.

En la fase de laboratorio III se aplicó el método fotocatalítico a las muestras de aguas obtenidas de las plantas de tratamiento antes mencionadas en diferentes tiempos

aplicando una concentración de 1.0 % de TiO_2 (anatasa) se aisló la Cepa de *E. coli* en diferentes tiempos para determinar la efectividad bactericida del proceso, el cual resulto ser efectivo en un 100%

Se escogieron dos muestras de agua al azar, una de ellas fue sometida al proceso fotocatalítico en ausencia de luz solar y con agitación, la otra en presencia de luz solar y sin agitación; de lo cual se concluyó que la luz solar no ejerce ningún efecto sobre el proceso fotocatalítico, pero la energía solar si ejerce cierto efecto, ya que el proceso fue más efectivo en días soleados que en días nublados. Sobre la agitación se concluyó que no ejerce ningún efecto.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; así mismo constituye un recurso unitario que se renueva a través del ciclo hidrológico que conserva, a efectos prácticos una magnitud casi constante dentro de cada una de las cuencas hidrográficas.

A medida que transcurre el tiempo se ha podido observar que la actividad humana, ha influido tanto en la calidad como en cantidad de agua, principalmente de ríos, ya que son utilizados para la eliminación y dilución de sustancias de desechos procedentes de ciudades e industrias lo que desmejora las condiciones de estética y salud pública.

La desinfección del agua es un proceso crucial para la industria, consumo humano y del medio ambiente. Prueba de ello es que los legisladores solicitan pruebas cada vez más estrictas de la eficacia de las distintas técnicas y procesos físicos, químicos, en eliminación de microorganismos en agua. Ya que es el principal vector de enfermedades y como consecuencia la calidad del agua.

Con el propósito de mejorar la calidad de agua, se da la necesidad de buscar tratamientos de desinfección de aguas y como alternativa para solventar dicho problema, se ha realizado la presente investigación en aguas de tipo ordinarios (agua residual generada por las actividades domésticas de los seres humanos tales como: uso de servicios sanitarios, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa y otros similares) a través del método fotocatalítico el cuál presenta numerosas ventajas en el tratamiento de aguas residuales con las cuales se ha comprobado que produce degradación de una gran variedad de contaminantes tóxicos, y además es posible utilizar la luz solar como una fuente eficiente de descontaminación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importancia del agua y su contaminación.

El agua es abundante en la tierra y muchos lugares tienen problemas de escasez y contaminación de este vital fluido, lo que lo convierte en uno de los principales problemas ambientales de este tiempo.

Los seres humanos dependen del agua dulce (3% en el planeta, de la cuál sólo es accesible 0.4%) una de las principales preocupaciones de nuestras sociedades, es la conservación y protección del agua (“Agüera *et al.*, 2004”).

Osorio (2002), establece que la contaminación del agua empieza cuando es añadida materia extraña perjudicial que altera su calidad. Se puede decir que el agua es de buena calidad, cuando reúne las condiciones necesarias o por lo menos contiene los niveles permisibles de diferentes sustancias para ser consumida por los seres humanos y los animales.

El problema de contaminación del agua se produce cuando el ser humano en la realización de sus diferentes actividades, descarga aguas de tipo ordinarias en los sistemas acuosos de los ecosistemas.

El problema de la contaminación del agua es motivo de preocupación mundial, porque está alcanzando niveles considerables que perjudican a la población (*Water: the essential Resource*) citado por Osorio (2002), un tercio de la humanidad vive en un estado permanente de enfermedad o debilidad causado por el agua impura; otro tercio se ve amenazado, por el vertido en el agua de sustancias químicas cuyos efectos a largo plazo se desconocen.

2.2 Tratamiento de aguas residuales.

Durante los primeros 75 años del siglo XX, prácticamente los únicos tratamientos de purificación de aguas que se utilizaron, fueron la floculación química, la filtración granular y la cloración. El cloro es el producto químico más comúnmente utilizado para la desinfección de agua debido a su habilidad para inactivar bacterias y virus (Trojan, 1989) cit. Por Augugliario *et al.*, (2003); sin embargo en los últimos 20 años se ha comenzado a considerar otros tratamientos alternativos (avanzados), a los tradicionalmente utilizados (Najam y Trussell, 2000) cit. Augugliario *et al.*, (2003). Una de las razones para ello es el hecho de que, últimamente, se ha puesto de manifiesto que el cloro, en presencia de impurezas orgánicas en el agua, puede generar sub-productos no deseados de desinfección tales como trihalometanos (THM), los principales THM formados son el cloroformo, el bromodiclorometano, el dibromoclorometano y el bromoformo; también reacciona con las sustancias húmicas presentes en los abastecimientos de agua, formando varios productos halogenados, los cuales se sospecha que son carcinógenos humanos.

Villanueva, *et al.*, (2004), afirma que las tecnologías de filtración con membrana (micro, ultra y nanofiltración y ósmosis inversa) se emplean cada vez más, aún a expensas de un costo significativo, la irradiación con luz ultravioleta (UV, 254 nm), aunque es una técnica compacta y de costo competitivo, se está introduciendo lentamente, ya que carece de capacidad oxidativa (control simultáneo de color, sabor y olores que ejerce el cloro o el ozono). Además aún existe información insuficiente sobre la dosis necesaria para la destrucción de muchos microorganismos y no se puede realizar con luz natural

El tratamiento de las aguas ordinarias es actualmente exigido por la legislación, cuyas normas son cada vez más estrictas debido al afán de lograr una mayor y mejor

depuración de las aguas para minimizar el deterioro de sus fuentes (“Agüera, *et al.*, 2004”).

Según la Enciclopedia Microsoft Encarta, 2003, define la depuración de aguas, es el como los distintos procesos implicados en la extracción, tratamiento y control sanitario de los productos de desecho arrastrados por el agua y procedentes de viviendas e industrias.

Agüera *et al.*, (2004), establecen que los tratamientos secundarios y terciarios en una planta de tratamiento de aguas de tipo ordinarias, en algunos casos no son eficaces, para la depuración de aguas que contienen contaminantes como: microorganismos, pesticidas, fenoles, disolventes clorados, antibióticos, etc. Por lo tanto es imperativo encontrar métodos alternos que complementen los actuales procesos para el tratamiento de estas aguas, biorecalcitrantes, favoreciendo así la protección, de ecosistemas y limitando el riesgo de contaminación química inducida por estas sustancias. La figura 1, muestra las etapas de tratamiento primario, secundario y terciario de aguas residuales.

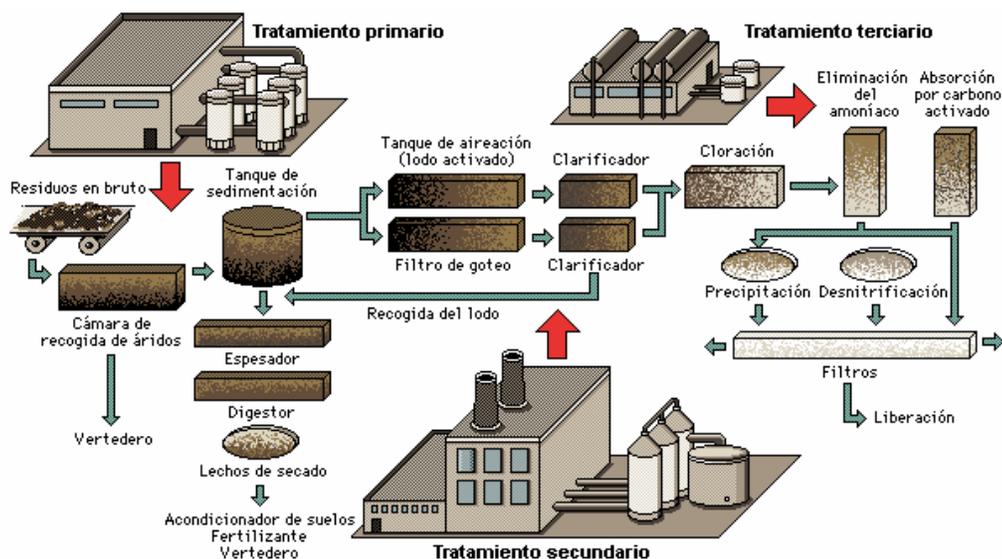


Figura 1. Tratamiento de aguas residuales. Tomado de Enciclopedia Microsoft Encarta (2003).

Clair *et al.*, (2000), afirman que las aguas residuales son materiales derivados de residuos domésticos y de procesos industriales, mientras que la Enciclopedia Microsoft Encarta, (2003), define como el conjunto de las aguas que son contaminadas durante su empleo en actividades realizadas por las personas; las cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales. Los materiales inorgánicos como la arcilla sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos y químicos; sin embargo si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica, el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que oxidan y convierten la materia orgánica en CO_2 , es por esto que los tratamientos de las aguas de desecho son procesos en los cuales los microorganismos juegan papeles cruciales. El tratamiento de las aguas residuales da como resultado la eliminación de microorganismos patógenos, evitando así que estos microorganismos lleguen a ríos o a otras fuentes de abastecimiento.

Carpenter (1967), sostiene que las aguas domésticas de desecho contienen de 500,000 a 20,000,000 microorganismos por mililitro en gran parte son bacterias intestinales, como las coliformes, pero también abundan microorganismos del suelo.

Las bacterias coliformes habitan en el intestino humano, son parte de la flora intestinal favorecen la digestión, en condiciones anormales pueden convertirse en patógenas y producir hasta el 90% de las diarreas infantiles e infecciones del tracto urinario (Enciclopedia Microsoft Encarta, 2003). Entre ellas se encuentra: *Escherichia coli*, *Aerobacter aerogenes*, y otras se asemejan morfológica y fisiológicamente, como bacilos cortos gram negativos que fermentan la lactosa forman ácido y gas son anaerobios facultativos y se multiplican con mayor rapidez a temperaturas entre 30°C y 37°C (Carpenter, 1967).

Debido a la problemática de la contaminación que se vive actualmente, la población se ha visto en la necesidad de mejorar e innovar los métodos de tratamientos, buscando siempre tecnologías más económicas y efectivas, ya que, aunque existen varias alternativas de tratamiento para cada contaminante, éstas no siempre resultan adecuadas a las necesidades de la industria y medio ambiente. Esto se ha visto recientemente plasmado en la instalación en Madrid, (España) de la primera planta industrial de Detoxificación Solar que se instala en el mundo (Figura 2) donde la energía solar se capta mediante colectores tipo Cilindro Parabólico Compuesto (CPC) diseñados y optimizados para este proceso (Gálvez, 2004)



Figura 2. Planta de detoxificación solar (Madrid, España). Tomado de Enciclopedia Microsoft Encarta (2003).

2.3 Procesos de oxidación Avanzada.

Agüera *et al.*, (2004), proponen nuevas tecnologías entre las que encuentran los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), que son por definición aquellos que generan radicales ($\cdot\text{OH}$) que por su alto potencial de oxidación ($E^{\circ} = 2.8 \text{ v}$) son capaces de oxidar todo tipo de sustancias orgánicas; sin embargo el uso de ozono (con o sin peróxido de hidrógeno o luz UV adicionales) y otros pueden presentar problemas de toxicidad en la operación, costo elevado, optimización de diseño y formación de

subproductos peligrosos para la salud. Un ejemplo es la formación de ión bromato en el caso de aguas ricas en bromuro. Esto ha despertado un interés particular en utilizar sistemas POA basados en mecanismos fotocatalíticos (TiO_2 , ZnO_2 , Sal FeII con Zinc y Ti) por la posibilidad de utilizar la luz solar, como fuente de fotones para generar los radicales ^0OH (“Agüera *et al.*, 2004”)

Los procesos de fotocátalisis solar para la degradación de contaminantes en agua, ofrecen ser innovadores, competitivos, y alternativos, además de mostrar la sinergia existente entre la energía solar y la conservación del medio ambiente; al contrario que la mayoría de los procesos fotoquímicos, es no selectivo y puede emplearse con mezclas complejas de contaminantes (Rubiano & Laguna, 2005).

Los principales objetivos para la incorporación de la energía solar en procesos químicos son: (Gálvez, 2004)

- Avance efectivo hacia la producción de los combustibles del futuro que permitan el almacenamiento de la energía solar.
- Reciclado de materiales y detoxificación de residuos tóxicos.
- Aporte de un sustituto a la electricidad en procesos fotoquímicos, fotocatalíticos y térmicos que permita la síntesis solar de productos de alto valor añadido.
- Demostración de la fiabilidad de la operación de sistemas solares a largo plazo.
- Elaboración de sistemas y procedimientos apropiados para garantizar parámetros estables en procesos operados bajo condiciones de discontinuidad solar.

Villanueva, *et al.*, (2004) establece que las llamadas tecnologías o procesos avanzados de oxidación, son cada vez más aplicados a la remediación y detoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala entre éstos se encuentra la fotocátalisis, la diferencia con la catálisis tradicional es el modo de activación del catalizador, en el cual la activación térmica es

reemplazada por activación fotónica, siendo el radical hidroxilo el oxidante primario responsable de la oxidación fotocatalítica.

2.4 Detoxificación solar

El proceso de detoxificación solar se basa en el uso de la interacción entre la radiación solar ultravioleta y las partículas de un semiconductor (normalmente el dióxido de titanio, producto no tóxico, abundante y barato), mediante una reacción de fotocatalisis que tiene un elevado potencial de aplicación en la destrucción industrial de compuestos orgánicos tóxicos presentes en agua (Peñuela, 2002).

Según Amanco (2004), a medida que las fuentes de agua sean más escasas, y exista una mayor la demanda tanto industrial y consumo humano, la necesidad de tratamientos innovadores y competitivos en costo serán mayores, existiendo un claro potencial para los procesos fotocatalíticos basados en la luz solar.

El proceso de detoxificación solar consiste en una oxidación avanzada basada en la generación de radicales orgánicos según Blanco & malato (2004), y mediante la adición de oxígeno originan radicales intermedios que terminan a través de sucesivos pasos oxidativos, en dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas. Una de las posibilidades existentes para generar radicales hidroxilo, especie fuertemente oxidante, es mediante la participación de un semiconductor (fotocatálisis), que absorbe radiación solar como lo muestra la figura 3.

Un proceso fotocatalítico es aquel en el cual una foto-reacción es acelerada mediante la presencia de un catalizador, que aumenta la velocidad de una reacción química sin ser consumido en ella. Independientemente de su naturaleza, este acelera la reacción al proveer una serie de etapas elementales con cinéticas más favorables que aquellas que se dan en su ausencia (Hurng, 2005)

Leal (2005), explica que el proceso de fotocatalisis se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz, formada entre un semiconductor iluminado y una solución acuosa, en esta interfaz hay una densidad local de carga diferente a la del seno de ambas fases, produciéndose un campo eléctrico que actúa como fuerza impulsora en el proceso de transferencia de carga. La interfaz semiconductor – solución acuosa tiene como rasgo distintivo que la redistribución de carga se extiende significativamente tanto del lado de la solución como del lado del semiconductor.

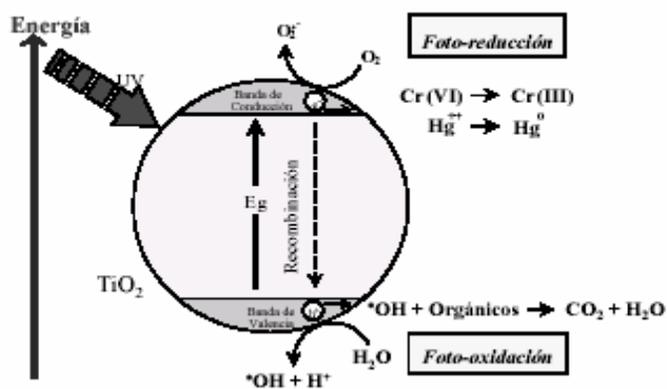


Figura 3. Proceso de degradación solar fotocatalítica: la activación de la partícula del catalizador, resulta en la generación de radicales hidroxilo ($^*\text{OH}$). Tomado de Aplicaciones Medioambientales Químicas de la Radiación Solar (2004).

El proceso básico de la fotocatalisis consiste en la excitación de electrones de la banda de valencia (CB) a la banda de conducción (CB) del semiconductor TiO_2 creando un hueco “h” en la banda de valencia (ausencia de carga negativa). Esta excitación se da por la absorción de luz ultravioleta con energía igual o superior al “band gap” (>3.2 e V) lo que la banda de energía (Leal, 2005).

La eficiencia del proceso fotocatalítico puede ser influenciada por ciertos factores: masa del catalizador, longitud de onda, concentración inicial de la solución,

flujo de radiación, rendimiento cuántico, pH, catalizador, diseño del reactor, aditivos etc. (Augugliario *et al.*, 2003)

2.5 Semiconductores más utilizados

Un semiconductor es un material que tiene una conductancia de un valor que se encuentra entre la de un conductor y la de un aislante, esto se debe principalmente a su estructura molecular (Hurng, 2005)

Leal (2005), recomienda algunos semiconductores que pueden ser usados como fotocatalizadores son: TiO_2 , WO_3 , CdSe , ZnO , y ZnS . De ellos el más utilizado para aplicaciones ambientales entre otras, es el Dióxido de Titanio TiO_2 , dado que es biológica y químicamente inerte, además de económico y resistente a la corrosión química y la fotocorrosión, oxidando generalmente tanto los compuestos tóxicos iniciales como los intermediarios generados en las reacciones de oxidación y no agota su fotoactividad tras una única utilización (por lo que, idealmente, también puede ser reutilizado durante un largo periodo de tiempo).

Según Peñuela (2002), los materiales semiconductores se pueden usar para fotosensibilizar la degradación de compuestos orgánicos, pero ambientalmente solamente unos pocos son apropiados para la fotosensibilización, ya que los otros no cumplen con alguno de los requisitos indispensables que son: (1) Ser fotoactivo en la región espectral de la luz solar, (2) ser biológica y químicamente inertes, (3) ser fotoestables, y (4) baratos. Así, TiO_2 , ZnO , CdS , SrTiO_3 , CdTe , WO_3 , SnO_2 , ZnS , SnO_2 y CdSe son materiales semiconductores.

Fajardo *et al.*, (2004), explica que los semiconductores poseen bandas asociadas con niveles de energía espaciados ente sí. La de menor energía presenta la mayor densidad electrónica y está asociada con los enlaces covalentes entre los átomos, recibiendo el nombre de banda de valencia. Los niveles de más alta energía se

encuentran vacíos se denominan bandas de conducción, ya que están relacionadas con esta propiedad en los materiales.

La diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción define, entre otros aspectos, la sensibilidad del semiconductor a la irradiación con una cierta longitud de onda. Por lo tanto, un agente reductor puede oxidarse al transferir un electrón al hueco foto generado en la superficie y un oxidante adsorbido puede reducirse al aceptar un electrón. Al pasar el electrón de la banda de conducción a la banda de valencia, deja un hueco en la banda de valencia. Así, por la excitación del semiconductor se generan dos especies, electrones y huecos, los cuales tienen cargas opuestas y pueden ser útiles para fines oxidantes o reductores según convenga como lo muestra. Los electrones son reductores y los huecos oxidantes, siendo su potencial redox dependiente de la naturaleza del semiconductor y la separación entre bandas (Hurng, 2005).

En la fotocatalisis se aprovechan ambas especies fotogeneradas, electrones y huecos. Por esto es importante la naturaleza del semiconductor y la separación entre las bandas, superficie el modelo ilustrado en la figura 4, proporciona una explicación aceptable para el mecanismo de la degradación oxidativa de material orgánico catalizada por un semiconductor, Augustinki, (1988) citado por. Fajardo *et al.*, (2004).

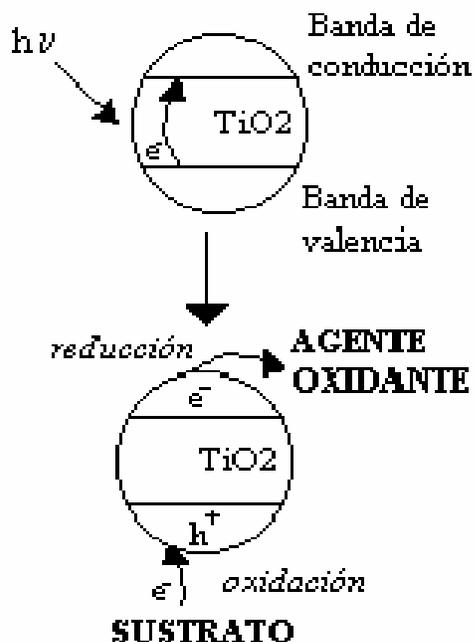


Figura 4. Reacción fotoinducidas redox sobre la superficie de TiO_2 . Tomado de Fajardo, *et al.*, 2004.

Vivas (2005), establece que el óxido de titanio es un semiconductor con máximo rendimiento cuántico, es un sistema ampliamente explorado y el óxido de zinc es otro importante semiconductor, aunque los dos son similares, la diferencia en morfología, las interacciones en la superficie y la dinámica en la transferencia de carga puede influir en la velocidad de degradación.

El TiO_2 es el semiconductor más ampliamente aceptado, entre otras razones, por su costo y resistencia, es un semiconductor muy estable, cuya estructura tridimensional puede hallarse en tres formas cristalográficas, de las cuales las más importantes son rutilo y anatasa, dependiendo del ordenamiento de las moléculas en los cristales (Vivas, 2005).

Respecto a la respuesta espectral del TiO_2 , Leal (2005), menciona que este material sólo es activo en la región ultravioleta cercana (UVA) debido a que su salto de banda (transición indirecta) se encuentra entre 3.02 – 3.23 eV, según si su estructura

crystalina es, respectivamente, rutilo o anatasa; por este motivo, el TiO_2 sólo puede aprovechar alrededor de un 5% de la intensidad del espectro de la luz solar, que es la parte que corresponde a la región ultravioleta que se encuentra por debajo de $\lambda = 400$ nm.

La estructura cristalina del TiO_2 más estable termodinámicamente es la estructura de rutilo. Sin embargo, la estructura que presenta mayor actividad fotocatalítica es la anatasa (Rubiano & Laguna, 2005), que es utilizada de manera habitual para aplicaciones de descontaminación ambiental y la forma rutilo, que se utiliza como blanqueador de pinturas y pigmentos, es mucho menos fotoactiva. (La Figura 5 muestra las 2 estructuras cristalinas más importantes).

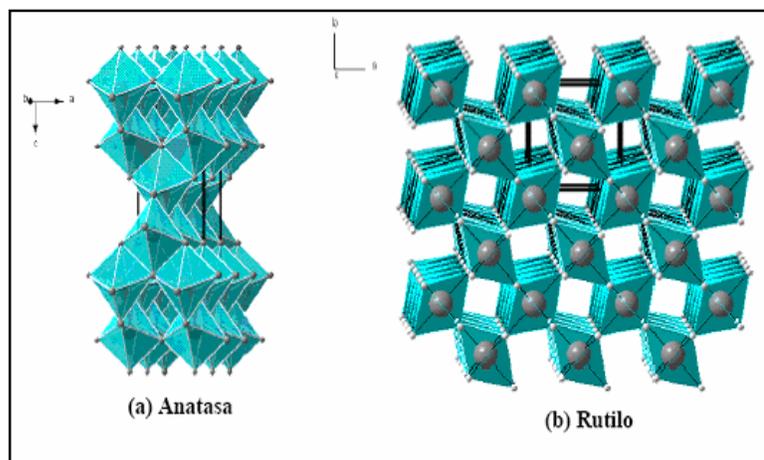


Figura 5. Estructuras cristalinas de TiO_2 anatasa (a) y rutilo (b). Tomado de Vivas león, (2004).

El TiO_2 es el fotocatalizador más comúnmente utilizado, pero presenta varios problemas que se intentan solucionar, Uno de ellos es su bajo rendimiento cuántico (número de procesos que tienen lugar por fotón de una cierta longitud de onda adsorbido por el fotocatalizador), que es normalmente inferior a 0.05 lo que causa un desaprovechamiento de la luz irradiada (Vivas 2005).

Herrera (1998), establece que los procesos de fotocatalisis solar para la degradación de contaminantes en agua; suponen una aplicación altamente novedosa y prometedora con un importante campo potencial de aplicación. Esto es debido al hecho de que este tipo de procesos suponen una clara demostración de la sinergia, existente entre la energía solar y la conservación del medio ambiente.

2.6. Efecto bactericida del proceso fotocatalítico.

La fotocatalisis como método de desinfección es un proceso básicamente inexplorado. Sin embargo, el efecto bactericida del TiO_2 ha sido demostrado en varios microorganismos, incluyendo *E. coli*, *Lactobacillus Streptococos*, y otros (Blake y col., 1999). cit. Augugliario *et al.*, (2003). Este efecto esta asociado con la división de la pared de la célula por oxidación superficial inducida fotocatalíticamente, dando como resultado la desintegración de la célula.

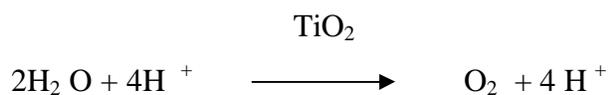
Rinco *et al.*, (s.a.) han realizado estudios sobre fotocatalisis haciendo uso de TiO_2 , determinando que la muerte de la bacteria se debe a la inactivación de la coenzima A, y provoca en el ADN de los microorganismos la dimerización de las bases Timinas. Estos dimeros de timina obstruyen la conformación de la doble hélice e interfiere con la duplicación normal del ADN. De otra manera la inactivación fotocatalítica es explicada por el ataque de los radicales fotogenerados de las superficies de la catálisis como el O_2^- , H_2O_2 , OH^- . De estas tres especies de radicales la que tiene la acción más potente el OH^- .

Matsunaga (1988), sugirió que existe una dimerización de la coenzima A (CoA). La función de la CoA es la de actuar como transportador de grupos Acilo en las reacciones enzimáticas implicadas en la oxidación del piruvato y las acetilaciones biológicas. El mecanismo químico preciso mediante el cuál la CoA transporta los

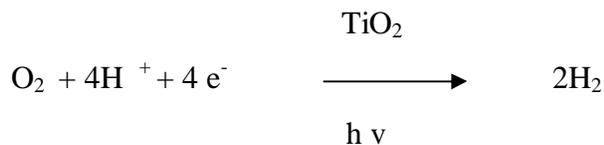
grupos acilos fue establecido por el bioquímico alemán F. Lynen, (1951) ambos autores citados por Rinco *et al.*, (s.a.).

Maness (1999), cit. Por Rinco *et al.* Reportó que la presencia de TiO_2 genera una reacción lipidoxidativa que da como resultado una pérdida de la actividad respiratoria de la bacteria.

En el primer paso de la reacción, el hidrógeno fotogenerado puede oxidar el H_2O .



Ahora el O_2 funciona como una acceptor de electrones químicamente revierte este proceso.



La dimerización de la CoA consiste en la formación de 2 unidades, que ya no permite la unión de el acetilCoA, que es indispensable para el ciclo de Krebs como parte del proceso de respiración, y al no formarse este se detiene este metabolismo importante para la vida de la célula (Rinco *et al.*, s.a.)

El uso de la luz solar para la eliminación de sustancias químicas sintéticas del medio ambiente se encuentra ampliamente documentado en la literatura científica, básicamente durante los últimos 15 años. Compuestos químicos orgánicos son degradados de forma natural por la luz del sol cuando se encuentran en la atmósfera disuelta en agua, absorbida en superficies minerales o se encuentran sobre las plantas. Estos ejemplos naturales de procesos fotoquímicos pasivos (sin la intervención humana)

muestran el papel que puede jugar la luz solar en la destrucción medioambiental de contaminantes. El problema al que se enfrentan actualmente los científicos e ingenieros es el desarrollo de sistemas tecnológicos que puedan usar estos procesos de forma eficiente y económica para el tratamiento de problemáticas medioambientales y efluentes industriales, (Gálvez, 2004).

2.7 Ventajas y desventajas del proceso fotocatalítico.

Algunas ventajas que ofrece la aplicación de fotocatalisis, en base a la experiencia acumulada en diferentes estudios previos (Malato y col., 2002) cit. Por Augugliario *et al.*, (2003) son las siguientes:

- Cuando se encuentran contaminantes no biodegradables, persistentes a pesar de tratamientos biológicos, los procesos fotocatalíticos resultan efectivos.
- Resulta efectivo para contaminantes con difícil tratamiento convencional.
- Es un proceso no selectivo.
- Se vuelve aún más efectivo en presencia de microorganismos y compuestos orgánicos; debido a su poder de desinfección y descontaminación simultánea como lo muestra la figura 6.
- Ejerce un poder bactericida.
- La implementación de cualquier aplicación de tecnología de fotocatalisis requiere una operación, supervisión y mantenimiento mínimos.
- Esta tecnología solar parece ser especialmente adecuada para aplicarse en zonas soleadas, como es el caso de los países en regiones tropicales.
- Degrada fácilmente la materia orgánica presente en aguas residuales.
- Permitirá disminuir los costos de tratamiento de agua.
- No genera residuos y no requiere de neutralización posterior de algún compuesto luego de su utilización.
- El contacto con los contaminantes es total.

- Permite una oxidación completa de los contaminantes a temperatura ambiente.
- La energía puede obtenerse de una fuente inagotable como es el sol.

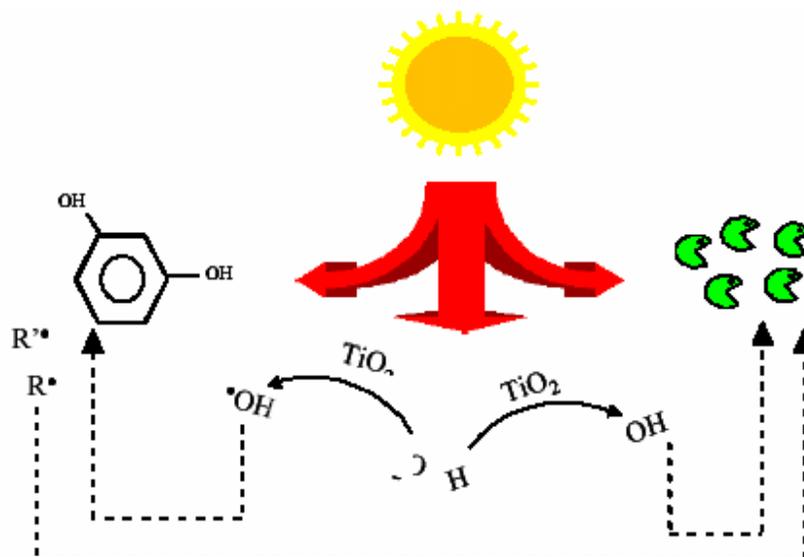


Figura 6. Desinfección y descontaminación simultánea mediante fotocatalisis. Tomado de Centro de Investigación Energético Medioambientales y Tecnológico. Plataforma Solar de Almería 2003.

Sin embargo, los sistemas fotocatalíticos con seguimiento solar poseen algunas desventajas, como la imposibilidad de concentrar la componente difusa de la radiación solar, la limitación es severa, ya que esta componente llega a representar el 50% de la radiación ultravioleta total que llega a la superficie terrestre, la discontinuidad en la disponibilidad de la energía solar, a menudo no permite satisfacer los requisitos de demanda de energía (Hidalgo *et al.*, 2005)

Leal (2005), menciona que la fotocatalisis aplicada tratamiento de aguas, se encuentra en un nivel preindustrial, pues sólo se han construido algunas plantas pilotos en el mundo. Es importante resaltar que para el uso industrial de esta tecnología se hace

necesario el estudio de aplicaciones de la energía solar, debido a su amplia disponibilidad.

2.8 Aplicaciones de la fotocatalisis

Existen diversas problemáticas específicas según Blanco (2004), con un potencial importante de aplicación para ésta tecnología, entre las cuales se encuentran:

- Compuestos fenólicos.
- Plaguicidas.
- Disolventes halogenados.
- Cianuros.
- Colorantes.
- Eliminación de iones metálicos.
- Descontaminación de agua.
- Destrucción de contaminantes orgánicos en emisiones gaseosas.

Otras aplicaciones recientes, desarrolladas por compañías japonesas y norteamericanas son:

- Utilización de filtros impregnados con TiO_2 que son iluminados y capaces de degradar sustancias causantes de mal olor.
- Pinturas de esterilización fotocatalítica para revestimientos antibactericidas y auto-limpiantes de paredes en centros quirúrgicos.
- Lámparas auto-limpiables para iluminación de túneles.
- Tratamiento de tumores cancerosos, hasta ahora solo estudiado en animales.
- Técnica alternativa en la limpieza *in situ* de suelos superficiales contaminados con pesticidas y herbicidas.
- Destrucción fotocatalítica de contaminantes en efluentes gaseosos.

Las investigaciones actuales apuntan a la aplicación de la fotocatalisis a escala industrial, en procesos de descontaminación de agua, aire y suelo, para tal fin se estudian principalmente modelos matemáticos, mejoras en los catalizadores y mayor aplicación de luz solar. Demostraciones exitosas muestran que hay aplicaciones donde estas tecnologías pueden ya competir, aunque se debe evaluar que los procesos sean técnicamente viables y razonables desde el punto de vista económico (Gálvez , 2004).

Leal A. (2005), prepone la combinación de la fotocatalisis con otras técnicas, (todos ellos en la generación de especies radicales capaces de oxidar la materia orgánica). Dos ejemplos son la adición de ozono (TiO_2/O_3), o de peróxido de hidrógeno ($\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$). En ambos casos se evidencia la disminución del tiempo de reacción cuando se utilizan las técnicas conjuntamente, respecto a su uso individual. Aunque la fotocatalisis ha demostrado ser adecuada para la destrucción de un amplio número de compuestos, en algunos casos la completa mineralización se alcanza muy lentamente y la eficiencia de los procesos, en términos de consumo de energía, sólo presenta ventajas para efluentes muy diluidos.

Múltiples estudios muestran un efecto sinérgico en la combinación de la fotocatalisis con otros procesos avanzados de oxidación (todos ellos en la generación de especies radicales capaces de oxidar la materia orgánica). Dos ejemplos son la adición de ozono (TiO_2/O_3), o de peróxido de hidrógeno ($\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$). En ambos casos se evidencia la disminución del tiempo de reacción cuando se utilizan las técnicas conjuntamente, respecto a su uso individual (Rubiano & Laguna, 2005).

Una aplicación realista debería incluir un tratamiento fotocatalítico preliminar para desinfectar parcialmente el agua y reducir el nivel de contaminantes orgánicos, seguido de cloración limitada para una verdadera descontaminación y evitar la formación de subproductos no deseados (Herrera 1998).

El creciente interés y preocupación, a escala mundial, hacia los problemas del medio ambiente unido a unas razonables expectativas de viabilidad tanto técnica como económica, han impulsado en los últimos años de forma importante las distintas aplicaciones industriales de la tecnología solar, (Gálvez, 2004).

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación es de tipo cualitativa-cuantitativa, por su aportación en el uso del proceso fotocatalítico como descontaminante; además de presentarse una recopilación de datos numéricos obtenidos a través de la fase de laboratorio donde se utilizó la fotosensibilización para descontaminar aguas de tipo ordinario.

3.1 TRABAJO DE CAMPO

3.1.1 FASE I se realizó en las instalaciones de la Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente y consistió en tomar una muestra del Servicio Sanitario del departamento de Biología para aislar una Cepa de *E. coli*.

3.1.2 FASE II consistió, en visitar y recolectar las muestras de agua (anexo 4), cada 15 días, durante 2 meses, de las siguientes plantas de tratamiento:

- 1. Planta Ciudad Real:** Ubicada en el cantón los amates, San Sebastián Salitrillo, Km. 76 carretera que conduce de San Salvador a Ahuchapán, con las siguientes coordenadas geográficas 89° 38' 36'' de longitud oeste y 13° 59' 59.2'' de latitud norte.

En esta planta de tratamiento se reconocieron las siguientes áreas (anexo1):

- § Caja colectora, donde llega toda el agua de las actividades humanas, previo a darle el tratamiento.
- § Estructura Parchall. El agua llega con poca materia orgánica.
- § Desarenador, Boquilla, Cámara de Gas, Filtros primario, secundario y terciario, Redactores.

§ Caja de descarga, conectada a una tubería, es descargada al río llamado dos ríos de donde se tomaron las muestras, las cuales fueron colectadas en frascos duran estéril después de haberles aplicado tratamiento en la planta.

2. Planta Santa Ana Norte: Ubicada en el Km. 71, de la carretera que conduce de Santa Ana a Metapán, con las siguientes coordenadas $89^{\circ} 31' 09.2''$ de longitud oeste y $13^{\circ} 69' 49.5''$ de latitud norte.

En esta planta de tratamiento se reconocieron las siguientes áreas (anexo 2):

- § Caja Colectora.
- § Parchall.
- § Desarenador.
- § Boquilla.
- § 2 filtros (primario y secundario).
- § 3 pilas de oxidación.
- § Pila de Sedimentación.
- § Caja de Descarga conectada a una tubería subterránea que desemboca en la quebrada mazácuha. Las muestras de esta planta, se tomaron de la pila de sedimentación, debido a que la baja de descarga y la tubería estaban subterráneas.

3. Planta Ciudad Obrera 26 de Enero: Ubicada en el Km. 38 carretera que conduce de San Salvador a Ahuchapán., con las siguientes coordenadas $89^{\circ} 20' 40''$ longitud oeste y $13^{\circ} 40' 50''$ latitud norte

En esta planta de tratamiento se reconocieron las siguientes áreas (anexo 3):

- § Caja Colectora.
- § Desarenador primario y secundario.
- § Estación de Bombeo 1 y 2.

§ Filtro Biológico (piedra).

§ Digestador de lodo, conectado a una canaleta que vierte sus aguas en el río agua caliente. La muestra fue tomada de dicha canaleta, posterior al tratamiento que se le da en la planta y luego fue llevada al laboratorio.

3.2. TRABAJO DE LABORATORIO

3.2.1 DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL AREA DE TRABAJO

La fase de laboratorio se realizó en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, ubicada en final Avenida Fray Felipe de Jesús Moraga sur, Santa Ana, El Salvador, C.A. se encuentra a 652 msnm, 89° 33' 10' de longitud oeste y las coordenadas geográficas son 13° 56' 22'' de latitud Norte.

3.2.2 FASE I. Preparación de los medios de cultivo. Se procedió a preparar agar Eosina Azul de Metileno (EMB) para el aislamiento de la cepa, este es un medio diferencial, y se interpretarán como *E. coli* aquellas colonias que poseen un brillo metálico, verdoso en luz reflejada, centro negro-azulado en luz refractada. (Merck, 1982).

Se preparó agar EMB y agar Macconkey utilizando la marcha, establecida por el Manual para Medios de Cultivos .MERK (1982). Otros de los medios utilizados fue el caldo lactosado .Tripton de Soya, el cual se preparó siguiendo una marcha establecida en el manual descrito anteriormente.

3.2.3 Desinfección del área de trabajo. Utilizando algodón impregnado de fenol al 5 % se procedió a frotar las mesas de trabajo e instrumentos (esta actividad se realizó cada vez que se utilizaba el laboratorio).

3.2.4 Esterilización de materiales. Se esterilizaron todos los materiales para evitar contaminación, se utilizó la autoclave, en el que la esterilización es a base de calor húmedo (vapor de agua) con un tiempo de 15 minutos o 15 libras de presión a temperatura de $120^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$, la humedad participa en la desnaturalización de las proteínas. Otro equipo utilizado fue la olla de presión Sanyo que alcanza 120°C y 15 libras de presión.

3.2.5 Aislamiento de la cepa de *E. coli*. Se realizó la siembra en cada una de las cajas de petri, posteriormente se encubaron a 37°C , observándose en las siguientes 24 horas (anexo 5), de acuerdo a la descripción antes mencionada se reconocieron las unidades formadoras de colonias (UFC) de *E. coli*, realizando de nuevo la siembra en dos tubos con tapón de rosca, conteniendo 8 ml de caldo lactosado (anexo 6), se encubo a 37°C observándose las 24 horas siguientes; obteniéndose dos cultivos puros de *E. coli*.

Se tomó con una pipeta graduada automática 0.1ml de cultivo puro, diluyéndose en 999.99 ml de agua destilada, para obtener un volumen de 1000 ml.

3.2.6 FASE II. Aplicación del método fotocatalítico a cultivos puros de *E. Coli*. Con una pipeta graduada automática se tomó 0.1 ml de la dilución antes descrita, para cada uno de los cinco elenmeyer que contenían 99.9 ml de TiO_2 diluido en 0.025 %, 0.5 %, 0.1 %, 1.0 % y 5 % respectivamente; obteniendo un volumen total de 100 ml. a estos elenmeyer se les agregó un agitador magnético, y colocándose sobre un vibrador magnético, en presencia de luz solar les fue aplicado el proceso fotocatalítico(anexo 7). Los tiempos de exposición al método fotocatalítico fueron de 5, 10, 20, 30, y 40 minutos para cada una de las concentraciones antes mencionadas, se tomó 0.1 ml de cada muestra, se realizó la siembra (anexo 8), en 25 cajas de petri con Agar Gasoy que es recomendado para el cultivo de *E. coli* (Merck, 1982), se encubaron a 37°C (anexo 9) y se observaron al pasar 24 horas. Se realizó una siembra de cada

una de las muestras sin la aplicación del método fotocatalítico, con el objetivo de establecer si el tratamiento era efectivo y para determinar la concentración más eficiente se aplicó el análisis de regresión. Este ensayo fue realizado por tres veces, para descartar el margen de error.

3.2.7 FASE III. Aplicación del método fotocatalítico a las muestras de agua obtenidas de las plantas. Se tomo 0.1 ml de las muestras de cada una de las plantas al 100 % debido a su baja concentración de UFC de *E. coli* se hizo la siembra en tres cajas de petri que contenían Agar macconkey, en el cual las colonias de E. Coli, presentan un color rojo con halo (Merck 1982), luego fueron encubadas a 37 ° C observándose a las 24 horas; estos cultivos previos al tratamiento nos permitieron establecer la acción del método fotocatalítico.

Se prepararon tres elenmeyer, con 99.9 ml de TiO₂ a una concentración de 1.0 %, para obtener un volumen de 100 ml, se colocó dentro de cada uno un agitador magnético, fueron colocados sobre un vibrador magnético, y en presencia de la luz solar se llevo a cabo el proceso fotocatalítico.

Transcurrido 5, 10, 20, 30, y 40 minutos, se tomo 0.1 ml de la muestra, y se realizó la siembra en 15 cajas de petri con Agar Maccokey se encubaron a 37 ° C y se observaron al pasar 24 horas para determinar la efectividad del proceso (anexo 10); este ensayo fue repetido 3 veces. Esta misma actividad se hizo con dos muestras tomadas al azar, una de ellas fue sometida al proceso fotocatalítico en ausencia de luz solar y con agitación, la otra en presencia de luz solar y sin agitación; para determinar su efecto en el proceso.

3.3 Análisis estadístico.

A los resultados obtenidos se les aplicó el análisis de regresión lineal, este término fue dado por Galton cit .por Wayne, (1987) para explicar fenómenos biológicos debidos a la asociación de dos variables que en este caso son la concentración y el tiempo. Así como también se determinó la media aritmética en los diferentes ensayos para establecer un dato promedio.

En está investigación se utilizo con el propósito de conocer la relación entre las dos variables, y se medirá por medio del coeficiente r^2 que posteriormente fue analizado e interpretado.

Otro de los factores a medir es la energía solar utilizada, se realizó por medio de un radiómetro expresado en mW/cm^2 .

4- RESULTADOS

Durante la aplicación del proceso fotocatalítico se obtuvieron los resultados siguientes:

Aplicación del método fotocatalítico a cultivos puros de *E. coli*. Utilizando de óxido titanio (anatasa) en diferentes concentraciones y tiempos.

Cuadro 1. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.025 % de TiO₂ anatasa (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	384.00	60.00	63.20	169.07
10	200.00	600.00	500.00	433.33
20	400.00	500.00	408.00	436.00
30	70.00	400.00	320.00	263.33
40	56.00	300.00	600.00	318.67
r ²	0.59	0.16	0.02	0.26

UFC = unidades formadoras de colonias.

Cuadro 2. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.05 % de TiO₂ anatasa (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	600.00	100.00	360.00	353.33
10	500.00	500.00	500.00	500.00
20	220.00	420.00	340.00	326.67
30	70.00	380.00	320.00	256.67
40	60.00	320.00	300.00	226.67
r ²	0.17	0.17	0.47	0.27

Cuadro 3. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.1 % de TiO₂ anatasa (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	96.00	600.00	584.00	426.67
10	68.00	580.00	520.00	389.33
20	600.00	800.00	360.00	586.67
30	120.00	700.00	320.00	380.00
40	13.00	180.00	300.00	164.33
r ²	0.15	0.47	0.70	0.44

Cuadro 4. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 1.0 % de TiO₂ anatasa (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	112.00	800.00	700.00	537.33
10	40.00	755.00	600.00	465.00
20	704.00	1000.00	440.00	714.67
30	28.00	700.00	380.00	369.33
40	15.00	300.00	120.00	145.00
r ²	0.26	0.58	0.92	0.59

Cuadro 5. Resultado del proceso fotocatalítico, aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 5.0 % de TiO₂ anatasa (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	312.00	880.00	1200.00	797.33
10	152.00	820.00	800.00	590.67
20	132.00	800.00	640.00	524.00
30	100.00	600.00	720.00	473.33
40	92.00	300.00	320.00	237.33
r ²	0.48	0.92	0.78	0.73

Cuadro 6. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico.

Repetición	mW/cm ²
Ensayo	
1	1.83
2	1.52
3	1.30

²
mW/cm = miliwats sobre centímetro cuadrado.

Aplicación del proceso fotocatalítico a aguas con *E. coli* diluido en 0.1 % utilizando óxido de titanio (rutilo) en diferentes concentraciones y tiempos.

Cuadro 7. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.025 % de TiO₂ rutilo (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	100.00	100.00
5	312.00	880.00	780.00	657.33
10	152.00	820.00	589.00	520.33
20	132.00	800.00	865.00	599.00
30	100.00	600.00	725.00	475.00
40	92.00	300.00	868.00	420.00

Cuadro 8. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.05 % de TiO₂ rutilo (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	105.00	548.00	630.00	427.67
10	25.00	632.00	590.00	415.67
20	58.00	636.00	800.00	498.00
30	150.00	656.00	765.00	523.67
40	38.00	672.00	699.00	469.67

Cuadro 9. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 0.1 % de TiO₂ rutilo (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	60.00	396.00	425.00	293.67
10	70.00	436.00	369.00	291.67
20	85.00	532.00	500.00	372.33
40	60.00	552.00	470.00	360.67

Cuadro 10. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 1.0 % de TiO₂ rutilo (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
5	14.00	320.00	398.00	244.00
10	17.00	424.00	430.00	290.33
20	28.00	636.00	740.00	461.33
30	60.00	628.00	649.00	445.67
40	43.00	640.00	833.00	505.33

Cuadro 11. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a un cultivo de *E. coli* a 0.1 % con una concentración de 5.0 % de TiO₂ rutilo (oxidante).

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	1000.00	1000.00	1000,00	1000,00
5	40.00	424.00	458,00	307,33
10	19.00	500.00	625,00	381,33
20	15.00	500.00	560,00	358,33
30	11.00	540.00	720,00	423,67
40	21.00	552.00	649,00	407,33

Cuadro 12. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico.

Ensayo	Repetición	mW/cm ²
	1	1.23
	2	1.10
	3	1.03

Aplicación del proceso fotocatalítico a las muestras de agua obtenidas de las plantas de tratamiento al 100 %, utilizando oxido de titanio (anatasa) a una concentración de 1.0 %.

Cuadro 13. Resultados del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Real a una concentración de 1.0 %.

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	10.00	20.00	30.00	20.00
5	1.00	0.00	0.00	0.33
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 14. Resultados del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Obrera 26 de enero a una concentración de 1.0 %.

Ensayo	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	20.000	20.000	800.000	280.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 15. Resultados del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Santa Ana Norte a una concentración de 1.0 %.

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	9.00	10.00	52.00	23.60
5	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 16. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Real, utilizando TiO_2 (anatasa) a una concentración de 1.0 % en ausencia de luz solar y con agitación.

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	20.00	25.00	20.00	20.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 17. Resultado del proceso fotocatalítico aplicado a una muestra de agua de la planta de tratamiento de Ciudad Real, utilizando TiO_2 (anatasa) a una concentración de 1.0 % en presencia de luz solar y sin agitación.

Repetición	1	2	3	X
Tiempo	UFC	UFC	UFC	UFC
0	20.00	28.00	28.00	28.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 18. Cantidad de energía solar durante el proceso fotocatalítico

Ensayo	Energía mW/cm ²
1	1.69
2	1.83
3	1.23

DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos en los cuadros del 1 al 5, (utilizando TiO_2 anatasa) y los cuadros del 7 al 11 (utilizando TiO_2 rutilo) en el proceso fotocatalítico en concentraciones de 0.025 %, 0.05 %, 0.1 %, 1.0 % y 5.0 %, para ambos casos, se establece que la estructura cristalina del TiO_2 más estable termodinámicamente es la estructura de rutilo. Sin embargo, la estructura que presenta mayor actividad fotocatalítica es la anatasa, ya que la fotodegradación de la bacteria fue en un 50 % aproximadamente mientras que con el TiO_2 rutilo, disminuyó solamente en un 35 % aproximadamente.

De las concentraciones antes mencionadas de TiO_2 anatasa, la que proporcionó mejores resultados fue 5.0 % con una r^2 promedio de 0.73 (ver cuadro 5), sin embargo con 1.0 %, se obtuvieron casi los mismos resultados presentando una r^2 promedio de 0.59 (ver cuadro 4), en base a un análisis de regresión lineal se estableció que la diferencia no era significativa por lo tanto la segunda resultó ser más económicamente viable; por consiguiente esta fue la concentración utilizada para el tratamiento de las aguas obtenidas de las plantas de tratamiento.

En los cuadros 13, 14, y 15 se muestran los resultados de la aplicación del proceso fotocatalítico a las muestras de aguas obtenidas de las plantas del tratamiento al 100 % ya que poseían una baja concentración de UFC de *E. coli*, utilizando TiO_2 anatasa a una concentración de 1.0 %, el tratamiento fotocatalítico fue efectivo en un 100 %, eliminando en su totalidad las UFC de *E. coli*. Estos resultados fueron generales para los tres ensayos de cada una de las tres plantas de tratamiento; excepto en el cuadro 13 que pertenece a ciudad Real, se observó 1 UFC a los 5 minutos, lo cual no se consideró significativo.

Los cuadros 6, 12 y 18 muestran la cantidad de energía solar medida con un radiómetro durante las diferentes etapas de aplicación del proceso fotocatalítico. En base a los resultados que muestran estos cuadros la cantidad de energía solar más baja fue de 1.10 mw/cm^2 y la más alta fue de 1.83 mw/cm^2 , con la primera se obtienen buenos resultados de la aplicación del tratamiento fotocatalítico ya que una concentración inicial de 1000 UFC a un tiempo cero, disminuyó hasta 300 UFC a los 40 minutos después de la aplicación; con la segunda se obtienen resultados excelentes observándose una disminución de 1000 UFC a un tiempo cero hasta a 120 UFC a los 40 minutos, estos datos se observan en los cuadros 3 y 4 respectivamente; estos análisis son en base al tratamiento fotocatalítico aplicado a un cultivo puro de *E. coli* a 0.1 %.

Respecto al tratamiento de las aguas de tipo ordinarias de las tres plantas se trabajó con las siguientes cantidades de energía 1.23, 1.69 y 1.83 mw/cm^2 tal como se muestra en el cuadro 18, los resultados fueron excelentes eliminando las UFC de las aguas en un 100 %, esto nos indica que dichas cantidades de energía son aceptadas para la realización del proceso fotocatalítico.

Los resultados de los cuadros 16 y 17 nos muestran que la luz solar ejerce un efecto mínimo en el proceso fotocatalítico, considerando los niveles de concentración inicial que presentan las aguas al momento de someterlas al tratamiento fotocatalítico, la fotodegradación de la bacteria se da en un 100 %. Al comparar con un cultivo de *E. coli* donde las UFC son mayores los resultados son diferentes ya que se necesita de un tiempo más prolongado y de mayor exposición al proceso. Considerando los resultados del cuadro 4 a los 40 minutos se observa una disminución promedio de 14 % mientras que con aguas de tipo ordinario con una concentración baja de UFC a los cinco minutos hay una eliminación total de UFC.

Cabe mencionar que una concentración elevada de *E. coli* en comparación a una concentración menor para la eliminación de UFC hay que disponer de un tiempo mayor que para una baja concentración esto se muestra en el cuadro 5 a una concentración de 5.0 % de TiO_2 (anatasa), la concentración de UFC es 1000 a un tiempo cero, a un tiempo de 40 minutos la eliminación es de 69 % de UFC mientras que en los cuadros 13, 14, y 15 la concentración de UFC es baja por lo tanto la eliminación de las UFC a sido totalmente eliminados a tiempo de cinco minutos y a una concentración de 1.0 % de TiO_2 (anatasa) todo lo antes mencionado nos indica que el proceso fotocatalítico es una alternativa para la descontaminación biológica y respuesta a los tratamientos químicos y físicos para aguas de tipo ordinario a diferentes concentraciones de TiO_2 (anatasa) y tiempos.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a la investigación hecha se recomienda lo siguiente:

- A. Para obtener mejores resultados el proceso de fotocátalisis debe ser aplicado en días soleados debido a su mayor cantidad de energía solar.
- B. Se recomienda usar el proceso fotocatalítico como un tratamiento preliminar para desinfectar parcialmente el agua y reducir el nivel de contaminantes orgánicos, seguido de otros tratamientos para una verdadera descontaminación.
- C. Utilizar TiO_2 , en la forma cristalográfica anatasa, debido a que es más fotoactivo y es utilizado para descontaminación ambiental.
- D. Utilizar TiO_2 , como semiconductor, debido a que es biológica y químicamente inerte, además de económico y resistente a la corrosión química y la fotocorrosión.
- E. Para el cultivo de *E. coli* utilizar como medio de cultivo Agar EMB, ya que se visualizan mejor la UFC.
- F. Investigar el efecto de la fotocátalisis sobre aguas con otro tipo de contaminantes como: plaguicidas, colorantes, iones metálicos, etc.
- G. Se recomienda aplicar la combinación de la fotocátalisis con otras técnicas (ozono, peróxido de hidrógeno) para obtener disminución en el tiempo de reacción.

H. Promover Investigaciones sobre tecnologías de aprovechamiento de la energía solar, para buscar alternativas a los métodos convencionales.

CONCLUSIONES

En base a la investigación hecha se concluye que:

- A. Existe una muerte bacteriana directamente proporcional al tiempo, cuando es aplicado el proceso fotocatalítico.
- B. La presencia de un agente oxidante es necesario para que se de la reacción fotocatalítica.
- C. La estructura cristalina del TiO_2 más estables termodinámicamente es la estructura de rutilo. Sin embargo, la estructura que presenta mayor actividad fotocatalítica es anatasa.
- D. Ambas estructuras cristalinas del TiO_2 (rutilo y anatasa) son útiles para la descontaminación, pero anatasa es más eficaz y constante en la fotodegradación de la bacteria.
- E. Existe degradación de la bacteria *E. coli* en el proceso fotocatalítico utilizando TiO_2 como agente oxidante.
- F. La concentración más efectiva del TiO_2 anatasa para descontaminar las aguas de tipo ordinario fue 5.0 % sin embargo la más económicamente viable es 1.0 %.
- G. El proceso fotocatalítico en presencia del TiO_2 Anatasa a una concentración del 1.0% descontamina en su totalidad de *E. coli* a las aguas de tipo ordinario a cualquier tiempo.
- H. La agitación no ejerce ningún efecto sobre el proceso fotocatalítico.

- I. La luz solar ejerce un efecto mínimo sobre el proceso fotocatalítico, pero la energía solar si ejerce cierto efecto, ya que el proceso fue más efectivo en días soleados que en días nublados.

- J. Una de las tecnologías más prometedoras a corto plazo es la detoxificación solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agüera, Ana. Malato, Sixto. Pulgarín, César (2004). *Investigación, desarrollo y aplicación de métodos heliofotocatalíticos para la descontaminación química y biológica de aguas residuales*. [Curso de Postgrado]. Consultado en junio. 12, 2005 en www.lasallista.edu.com.
- Amanco (2004). *Soluciones Ambientales para el manejo de aguas residuales*. San Salvador: [Presentación del proyecto] 71 diapositivas.
- Augugliario, V. Blanco, S. Gálvez, V. (2003). *Aplicación de la energía solar ultravioleta al tratamiento de la contaminación por compuestos no biodegradables*. Consultado en marzo, 10, 2005 en www.descontaminacion_mediantete_fotocatalis.pdf.
- Blanco, J. Malato, S. Vidal, A (2004). *Tratamiento de contaminantes en agua mediante Fotocatálisis solar*. Consultado en julio, 21, 2005 en www.tratamiento_de_contaminantes_x_fotocatalisis.pdf.
- Carpenter P.L. (1967). *Microbiología*. México: Interamericano. S.A.
- Castañeda (1980). *Bioestadística aplicada a la agronomía, Biología y Química*. México: Trillas, 223 pp.
- Clair, Sawyer. McCarty, Perry. Parkin, Gene (2000). *Química para Ingeniería ambiental*. (Traducido por Lucia Arteaga de García). Colombia: Editora Emma Ariza H. (Original publicado en 1995.)
- Enciclopedia Microsoft Encarta. (2003). 1993-2002 Microsoft Corporation.

- Fajardo, Edwin. Sanchis, Natali. Thomas, Natalie. (2004). *Destrucción fotocatalítica de contaminantes orgánicos en agua*. Consultado en julio, 24, 2005 en www.an.mx/publicaciones/respyn/especiales/ec_10_2_2004/presentación_de_trabajo%20.htm.
- Herrera, Leandro (1998). *Aplicaciones de Biotecnología Ambiental*. Consultado en julio, 29, 2005 en www.Lauca.usach.cl/ima/cienti/htm.
- Hidalgo, Margarita. Apella, Maria. Litter, Martha. Blesa, Miguel (2005). *Tecnologías económicas de la potabilización de agua en zonas aisladas de Latinoamérica. Revista electrónica para el postgrado de la USAM*. Consultado en septiembre, 8, 2005 en www.e_mag_postgrado.usam.edu.ar/R0408/blesa.htm.
- Hurng Jinn Lin (2005). *Diseño y evaluación de un reactor de lecho fijo para la Fotocatálisis heterogénea*. Consultado en septiembre, 8 2005 en www.uflo.edu.ar/dya/volumen1.
- Jawetz, Melnick y Adelberg (1971). *Manual de Microbiología Medica*. México: Manual Moderno S.A. de CV, 617 PP.
- Jawetz, Melnick y Adelberg (1996). *Microbiología Medica*. México. D.F Santa fe de Bogota, Colombia 815 pp.
- Gálvez, Julián (2004). *Aplicación Medioambientales Químicas de la radiación solar*. Consultado en junio, 18, 2005 en www,scp_Qca_solar.pdf.
- Lara, José. Velásquez, Porfirio. (2002). *Matemática para 9º grado*. El Salvador: Lara Velásquez. 222 pp.

Leal Ascencio, Maria Tereza (2005). *Desinfección de agua por fotocátalisis heterogénea*. Consultado en junio, 3, 2005 en www.monografias.com.htm.

MERCK (1982). *Manual para Medios de Cultivos*. Alemania: Frankfurter Stasse, R.F.

Osorio, José (2002). *Protejamos el agua* (Modulo de Educación Ambiental). San Salvador: Impresora Digital Publicitaria. 51 pp.

Polanco, Moris (2002). Apastyle guía para la elaboración de referencias bibliográficas (Versión 1.1.28) [Programa de computación]. Guatemala.

Peñuela, Gustavo (2002). *Diseño y construcción de sistemas prototipo de descontaminación de aguas usando luz solar y/o luz ultravioleta*. Consultado en septiembre, 10, 2005 en [www.univalle.edu.col_gaox/algunos ~ resultados.html](http://www.univalle.edu.col_gaox/algunos~resultados.html).

Rinco, Ángela, Pulgarín, Cesar. Nevenka, Adier., & Peringer Paúl. *Interaction between E. coli Inactivation and DBP_precuesor_dihydroxibenzene isomers_in the photocayalyciy process o drinking water disinfection with TiO₂*. Institute of environmental Enginerin Laboratory for environmentals Enginerin of Technology: Lausanne, Switzerland.

Rubiano, M. Laguna, William. (2005). *Posibilidades de aplicaciones de fotocátalisis heterogénea*. Consultado en junio, 18, 2005 en www.monografias.com/

Villanueva, R. Hernández, M. Granados, A. (2004). Las Aplicaciones de la oxidación avanzada para el tratamiento de riles. *Ecoamérica*. Consultado en junio, 9, 2005 en: www.ecoamerica.cl/main/index.php?option=comcontent&task=blogcategory&id93&Itemid=81.

Vivas León. (2005). *Conceptos Físicos*. Consultado en junio, 12, 2005 en www.fen.upc.es/wib/virtualab/vivasLeon/conceptos_fisicos.htm.

ANEXOS**Anexo 1. Infraestructura de la planta de tratamiento Ciudad Real.****1-a. Estructura de toda la planta.****1-b. Caja colectora de agua.****1-c. Desarenador.****1-d. Tanque mezclador de cloro.****1-e. Filtro primario y secundario.****1-f. Pila de sedimentación.**

Anexo 2. Infraestructura de la planta de tratamiento Santa Ana Norte.



2-a. Caja colectora de agua.



2-b. Estructura parchall.



2-c. Desarenador.



2-d. Filtro primario.



2-e. Filtro secundario.



2-f. Pilas de oxidación y sedimentación.

Anexo 3. Infraestructura de la planta de tratamiento Ciudad Obrera 26 de enero.



3-a. Estructura parchall.



3-b. Caja colectora de agua.



3-c. Filtro Biológico primario.



3-d. Pila de sedimentación.



3-e. Digestador de lodo.



3-f. Pilas recolectoras de abono orgánico.

Anexo 4. Toma de muestras de aguas.



4-a. Planta de tratamiento Ciudad Real.

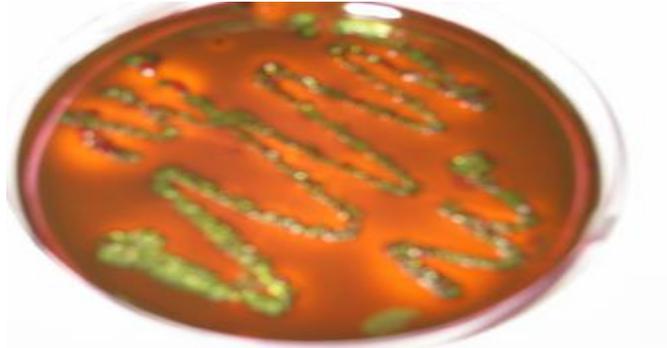


4-b. Planta de tratamiento Santa Ana Norte.



4-c. Planta de tratamiento Ciudad Obrero 26 enero.

Anexo 5. Aislamiento de la cepa de *E. coli*.



a) Cepa de *E. coli* en agar EMB.



b) Cultivo puro de *E. coli* en caldo Lactosado Triptona de Soya.

Anexo 6. Muestra sometidas al tratamiento fotocatalítico.

Anexo 7. Siembra de muestras posterior al proceso fotocatalítico.



8-a. Siembra de cultivo Puro de *E. coli*.



8-b. Isopado de la muestra.

Anexo 8. Cultivos posteriores al tratamiento fotocatalítico, a diferentes tiempos y concentraciones de TiO₂.



8-a. Cultivos a diferentes tiempos y concentraciones.



8-b Cultivo a 5 minutos de tratamiento fotocatalítico.



8-c. Cultivo a 20 minuto de tratamiento fotocatalítico.



8-d. Cultivo a 10 minutos de tratamiento Fotocatalítico.

Anexo 9. Cultivos posteriores al tratamiento fotocatalítico, después de 24 horas de incubación.

