

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA FOTOCATÁLISIS MEDIANTE
TÉCNICAS DE RADIACIÓN Y COMPUESTOS FOTO-OXIDANTES, COMO
ALTERNATIVA DE LA POTABILIZACIÓN DE AGUA EN ZONAS RURALES**

LAURA FERNANDA CANÓN NIÑO

SILVIA PAOLA PEDROZA NIETO



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2016**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA FOTOCATÁLISIS MEDIANTE
TÉCNICAS DE RADIACIÓN Y COMPUESTOS FOTO-OXIDANTES, COMO
ALTERNATIVA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN ZONAS RURALES**

**LAURA FERNANDA CANÓN NIÑO
SILVIA PAOLA PEDROZA NIETO**

**Proyecto de tesis de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**Director:
Rafael G. Barragán G.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C
2016**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, el agradecimiento va dirigido a nuestros padres, quienes nos impulsaron para estudiar y salir adelante como profesionales.

En segundo lugar queremos agradecer al docente Rafael Barragán por habernos permitido trabajar con él y dirigir nuestro proyecto, por la paciencia y su tiempo dedicado a guiarnos durante todo el proceso práctico; esperando haber aportado a su vida profesional.

Agradecimientos Laura Cañón:

Quiero agradecer en Primer lugar a Silvia Pedroza mi compañera de tesis y amiga, por todo el trabajo realizado durante este año y el tiempo invertido para sacar adelante el proyecto, por la gran amistad construida durante la carrera y las cosas aprendidas.

A mis Padres por permitirme llegar hasta acá y apoyarme para culminar mis estudios, en general a mis amigos, familiares, a mi hermana Paola y todos aquellos que tuvieron relación con mi vida estudiantil.

Agradecimientos Silvia Pedroza:

Quiero agradecer a mi compañera de tesis y amiga Laura Cañón por el trabajo realizado y los logros alcanzados durante el desarrollo del proyecto, por la paciencia durante todas las situaciones presentadas y la fuerte amistad construida durante la carrera.

A mi Madre por brindarme su ayuda durante mis estudios, a mi esposo por su apoyo y amor durante este proceso, y a su Padre Carlos Ortiz por su apoyo incondicional para culminar mi carrera.

En general a todas aquellas personas con las que compartí durante esta etapa y que trabajaron junto conmigo.

A todos ustedes les agradecemos de todo corazón.

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. MARCO CONCEPTUAL	12
2.1 Conceptos básicos.....	12
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1 Condiciones climatológicas	13
3.1.2 <i>Condiciones climatológicas en Bogotá</i>	13
3.2 Desinfección del agua.....	15
3.2.1 <i>Desinfección solar SODIS</i>	15
3.3 Fotocatálisis.....	16
3.3.1 <i>Potencial de la fotocatálisis para la desinfección del agua</i>	17
3.4 Dióxido de Titanio (TiO ₂).....	17
3.4.1 <i>Propiedades</i>	18
3.4.2 <i>Procesos de Oxidación Avanzada</i>	18
3.4.3 <i>Fotocatálisis Heterogénea</i>	18
3.4.4 <i>Efecto del pH en la desinfección mediante fotocatálisis</i>	19
3.5 Aceite de oliva y de clavo	20
4 OBJETIVOS.....	21
4.1 Objetivo general.....	21
4.2 Objetivos específicos	21
5 JUSTIFICACIÓN.....	22
6 DELIMITACIÓN	23
7 DESARROLLO CENTRAL.....	25
7.1 Metodología	25
7.1.1 Evaluación de condiciones iniciales: <i>Clasificación de aspectos a evaluar según normativa</i>	25
7.1.2 <i>Ensayos de calibración y conocimiento de equipos</i>	25
7.2 Recolección de la muestra.....	27
7.3 Fase 1: Montaje de botellas de vidrio	28
7.4 Diseño experimental	29

7.5	Fase 2: Ensayos para <i>E. coli</i>	31
7.5.1	<i>Montaje de muestras en laboratorio</i>	31
7.6	Fase 3: Inmovilización de TiO_2 en las muestras	33
7.6.1	<i>Inmovilización del dióxido mediante aceite de oliva y de clavo</i>	34
7.6.2	<i>Inmovilización de aceite mediante deposición seca</i>	34
7.7	Fase 4: Exposición tubos de ensayo a lámpara UV.....	34
7.7.1	<i>Preparación de cajas de Petri y medio para la siembra</i>	34
7.8	Fase 5: Exposición de botellas pet a lámpara UV	34
7.8.1	<i>Exposición de botellas con muestra de agua de pecera</i>	35
7.8.2	Exposición de botellas a Radiación Solar con muestra de agua de la quebrada y de pecera.....	35
7.9	Análisis estadístico	36
7.9.1	<i>Análisis de varianza</i>	36
8.	IMPACTO SOCIAL	38
9.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
9.1	Resultados de los datos de calibración y referencia	39
9.1.1	<i>Datos de calibración</i>	39
9.2	Fase 1: Montaje en botellas de vidrio: Análisis del efecto de cada concentración sobre las variables estudiadas	40
9.2.1	<i>Datos obtenidos con muestras cubiertas</i>	40
9.2.3	Datos obtenidos para muestras sin cubrir	44
9.2	Fase 2: Análisis de ensayo de <i>E. coli</i>	51
9.3	Fase 3 y 4: Análisis de resultados en la inmovilización de TiO_2 en las muestras.....	52
9.4	Fase 5: Análisis de la exposición de muestras en botellas Pet.....	54
9.4.1	Muestras de agua de pecera expuestas a la lámpara UV	54
9.4.2	Muestras de agua de pecera y quebrada expuestas a radiación solar ..	54
9.	CONCLUSIONES	56
10	RECOMENDACIONES.....	57
11	BIBLIOGRAFÍA.....	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros medidos en este estudio.....	25
Tabla 2 Tiempos de muestreo	27
Tabla 3 Grupos de muestreo y repetición	29
Tabla 4 Toma de datos por tiempo de exposición	32
Tabla 5 Planteamiento de tubos de ensayo	33
Tabla 6 Muestras para ensayo en pet.....	35
Tabla 7 Muestras para ensayo.....	35
Tabla 8 Cuadro base para la relación de significancias	36
Tabla 9 Datos de calibración.....	39
Tabla 10 Datos de referencia fisico-químicos de la quebrada	39
Tabla 11 Ensayos de referencia con concentraciones de TiO_2	39
Tabla 12 Resultados de datos de referencia.....	40
Tabla 13 Significancia del tiempo de exposición para pH	45
Tabla 14 Significancia de la concentración para pH	45
Tabla 15 Significancia del tiempo de exposición para la conductividad	46
Tabla 16 Significancia de la concentración para la conductividad	47
Tabla 17 Significancia del tiempo de exposición para Potencial de óxido reducción	48
Tabla 18 Significancia de la concentración para potencial óxido reducción	49
Tabla 19 Significancia del tiempo de exposición para sólidos totales.....	50
Tabla 20 Significancia de la concentración para sólidos totales	50
Tabla 21 Resultados de ensayo para E.coli.....	51
Tabla 22 Conteo de colonias UFC/caja	52
Tabla 23 Prueba de tukey para conteo colonias por periodo de exposición para aceite de Oliva	53
Tabla 24 Conteo de UFC/caja por tiempo de exposición	54

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Promedio radiación en Bogotá.....	14
Ilustración 2 Diagrama de trayectoria del sol, Altitud y Acimut para Bogotá	14
Ilustración 3 Esquema del mecanismo de la fotocatálisis	17
Ilustración 4 Esquema del sistema de potabilización de agua convencional	23
Ilustración 5 Calibración de equipos en laboratorio	26
Ilustración 6 Ensayo de referencia.....	27
Ilustración 7 Ubicación de lugar de recolección de la muestra	28
Ilustración 8 Montaje en proceso	30
Ilustración 9 Toma de datos en laboratorio (8 días exposición)	30
Ilustración 10 Medio de cultivo	31
Ilustración 11 Muestras expuestas en lámpara UV	32
Ilustración 12 Muestras etiquetadas	32
Ilustración 13 Muestras bajo lámpara UV	33
Ilustración 14 Montaje en laboratorio	35
Ilustración 15 Gráfica de pH para muestras cubiertas	41
Ilustración 16 Gráfica de conductividad para muestras cubiertas	42
Ilustración 17 Gráfica de potencial de óxido reducción para muestras cubierta	43
Ilustración 18 Gráfica de sólidos totales para muestras cubiertas	44
Ilustración 19 Gráfica de pH para muestras sin cubrir	44
Ilustración 20 Gráfica de conductividad para muestras sin cubrir	46
Ilustración 21 Gráfica de óxido reducción para muestras sin cubrir	47
Ilustración 22 Gráfica de sólidos totales para muestras sin cubrir	49
Ilustración 23 Conteo de UFC/caja por tratamiento para agua de pecera	55
Ilustración 24 Conteo de UFC/caja por tratamiento para agua de quebrada	55

RESUMEN

La dificultad al acceso de agua potable en el área rural se ha convertido en una problemática cada vez más apremiante, dando como resultado enfermedades y bajos estándares en calidad de vida según cifras entregadas por el DANE, en la presente investigación se estudiará y analizará un método de potabilización sencillo y económico enfocado en la etapa de desinfección, que permita a familias que no cuenten con acueducto, tratar el agua de cuerpos hídricos cercanos para su consumo. Se propone una alternativa mediante la fotocatalisis y el dióxido de titanio (TiO_2) con el fin de implementar la técnica más adecuada, teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos escogidos mediante la resolución 2115 de 2007. Se evaluaron diferentes técnicas de desinfección regulando pH, conductividad, sólidos disueltos y potencial de óxido reducción, determinando así las combinaciones para poder cumplir con el proceso, teniendo en cuenta días de exposición solar, cubierta de la botella y la concentración de dióxido de titanio utilizada.

Palabras clave: *Fotocatalisis, potabilización, radiación UV, concentración, tiempo de exposición.*

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el consumo y acceso de agua de potable es uno de los principales problemas que aquejan a diferentes poblaciones, tanto rurales como urbanas, del total de planes de desarrollo analizados en Colombia según la UNICEF, 568 municipios que equivalen al 56% incluyen la cobertura urbana de acueducto en sus diagnósticos, mientras que el 44% restante no lo hace. Para las zonas rurales y de población dispersa, solo el 35% de los municipios incluyen el dato de cobertura de acueducto, de los municipios que realizan un análisis con datos estadísticos sobre la cobertura de acueducto, 496 (86%) reporta que más del 75% de la población del área urbana tiene acceso a este servicio, mientras que para el área rural solo 87 municipios (25%) tienen cobertura de acueducto mayor al 75% de la población [1].

La gran mayoría de la población afectada cuenta con cuerpos hídricos cercanos para su consumo, siendo esta una posible alternativa al problema de abastecimiento en las diferentes zonas del país, dicha población no tiene en cuenta los riesgos que corre por este consumo directo, esto se puede dar por la desinformación que se presenta en las zonas más alejadas y la falta de programas de desarrollo que permitan un avance en el tema de necesidades básicas [1]. El agua no purificada puede generar distintas afectaciones a la salud como parásitos intestinales, cólera, diarrea, paludismo, entre otras, poniendo en riesgo la salud de aquellas personas que la consumen, cualquier cuerpo de agua contiene una carga contaminante por mínima que sea, teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos por la normatividad colombiana sobre calidad agua potable en este caso la resolución 2115 de 2007 [2].

Los métodos tradicionales involucran tratamientos biológicos, físicos y químicos, y la eficacia de cada método depende del tipo de tratamiento, condiciones de operación, corrosión de equipos, fisiología de los microorganismos, concentración y tiempo de exposición a los reactivos, pH, temperatura y resistencia de los contaminantes. Uno de los métodos tradicionales es el uso de cloro, aunque es efectivo tiene algunas desventajas como las altas concentraciones de materia orgánica que pueden inhibir la eliminación de patógenos y generar subproductos clorados con efectos adversos potenciales para la salud (Trihalometanos (THMs)), también el uso de reactivos clorados provoca corrosión de los equipos, son dependientes del pH, sensibles a la temperatura, el aire, los metales y a la concentración de materiales orgánicos, en diferente medida respecto a cada reactivo clorado [3].

En años recientes ha aumentado el interés por desarrollar metodologías de desinfección alternativas, que no generen subproductos peligrosos y cuenten con otras características deseables como alta eficacia y bajos costos de operación. Los procesos avanzados de oxidación emergen como técnicas prometedoras. Estos procesos que involucran la generación de radicales hidroxilo para efectuar la purificación del agua, han demostrado ser eficientes e incrementar la cinética de

degradación y el nivel de biodegradabilidad de muchos microorganismos, surfactantes y otros compuestos orgánicos [4].

Se ha reportado que la energía solar puede ser utilizada efectivamente en la desinfección de agua, dado que la inactivación de los microorganismos se alcanza, ya sea calentando el agua a altas temperaturas, por arriba de 70°C, o exponiéndola cerca del intervalo UV entre 300 y 400 nm. La fotocátalisis solar es un proceso avanzado de oxidación que utiliza la radiación solar para la producción de radicales hidroxilo y utiliza principalmente dióxido de Titanio (TiO_2) como foto catalizador [5]. Actualmente no es posible usar concentraciones más altas de TiO_2 por el “efecto pantalla” [6] y los materiales usados para exponer el agua a la radiación solar pueden generar interferencia en el tratamiento. Este proyecto aporta a la investigación la inmovilización con aceite de oliva, que además de sus beneficios para la salud, aglomera el dióxido permitiendo el paso de los rayos UV.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Conceptos básicos

Análisis microbiológico del agua: Son los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

Análisis básicos: Es el procedimiento que se efectúa para determinar:

- Turbiedad: es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión.
- Color verdadero: Resulta de la presencia en solución de diferentes sustancias como iones metálicos naturales, humus y materia orgánica disuelta.
- pH: Indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.
- Coliformes totales: Bacterias Gram Negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a 37°C, produciendo ácido y gas (CO₂) en un plazo de 24 a 48 horas. Se clasifican como aerobias o anaerobias facultativas, son oxidasa negativa, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la β galactosidasa.
- *Escherichia coli*: Bacilo aerobio Gram Negativo no esporulado que se caracteriza por tener enzimas específicas como la β galactosidasa y β glucoronidasa. Es el indicador microbiológico preciso de contaminación fecal en el agua para consumo humano.

Conductividad: La conductividad se define como la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica y es lo contrario de la resistencia. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm), con una magnitud de 10 elevado a -6, es decir micro Siemens/cm (**μ S/cm**), o en 10 elevado a -3, es decir, miliSiemens (**mS/cm**).

Tratamiento o potabilización: Es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla apta para el consumo humano.

Valor aceptable: Es el establecido para la concentración de un componente o sustancia, que garantiza que el agua para consumo humano no representa riesgos conocidos a la salud.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Condiciones climatológicas

3.1.1 Condiciones climatológicas en Colombia

“La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima en nuestro planeta. La región de mayor radiación solar en el país es la península de La Guajira y sus valores máximos se presentan en el mes de julio, con promedios superiores a $650 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$. Este valor desciende gradualmente hasta diciembre, mes en que se presenta el valor mínimo de $530 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$.

Con el mismo comportamiento durante el año, le sigue la parte media del valle geográfico del río Cauca, el valle del río Magdalena hasta la costa Atlántica y la zona de Cúcuta. Los valores extremos se presentan en julio y diciembre con valores de 550 y $450 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$, respectivamente. En la Amazonía, por el contrario, el valor máximo se presenta en octubre, con $330 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$.

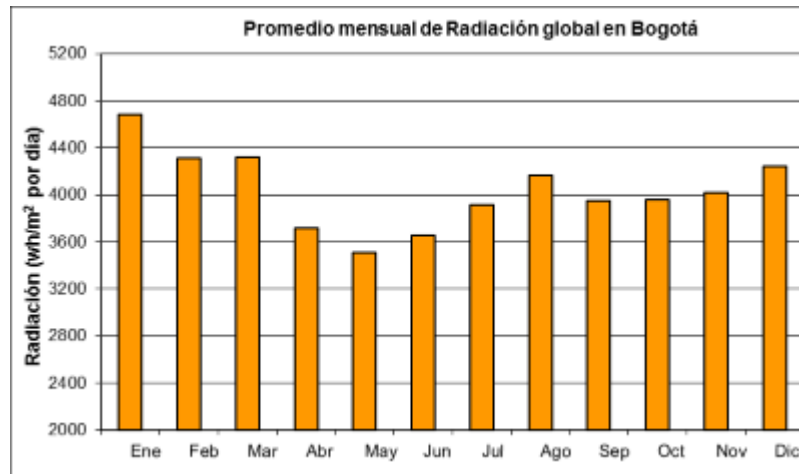
En la región Andina sobresale el altiplano Cundiboyacense, con valores máximos en febrero en los niveles de $480 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$, que luego descienden gradualmente hasta junio, mes de mínimos con $420 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$; nuevamente se incrementan poco a poco hasta septiembre, para descender hasta noviembre. El resto de la región Andina presenta el mismo comportamiento durante el año con menores valores, con extremos de 400 y $320 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ para febrero y junio.

Las zonas con niveles más bajos de radiación son la costa del Pacífico y el piedemonte Llanero en el área circundante de Villavicencio, con promedios menores de $300 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$; durante el año presentan poca variabilidad, siendo los meses de marzo y abril los de mayor radiación, mientras que noviembre y diciembre se caracterizan por ser los meses de menor radiación, con valores extremos de 320 y $280 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ [7]. Ver Anexo

3.1.2 Condiciones climatológicas en Bogotá

En cuanto a la distribución diaria mensual de la radiación solar para la zona de estudio la cual es la ciudad de Bogotá, se observa que los meses con mayores registros diarios de radiación son: Enero, Febrero y Marzo con valores mayores a $4300 \text{ (Wh/m}^2 \text{ por día)}$. Enero registra el más alto grado de radiación con $4700 \text{ (Wh/m}^2 \text{ por día)}$

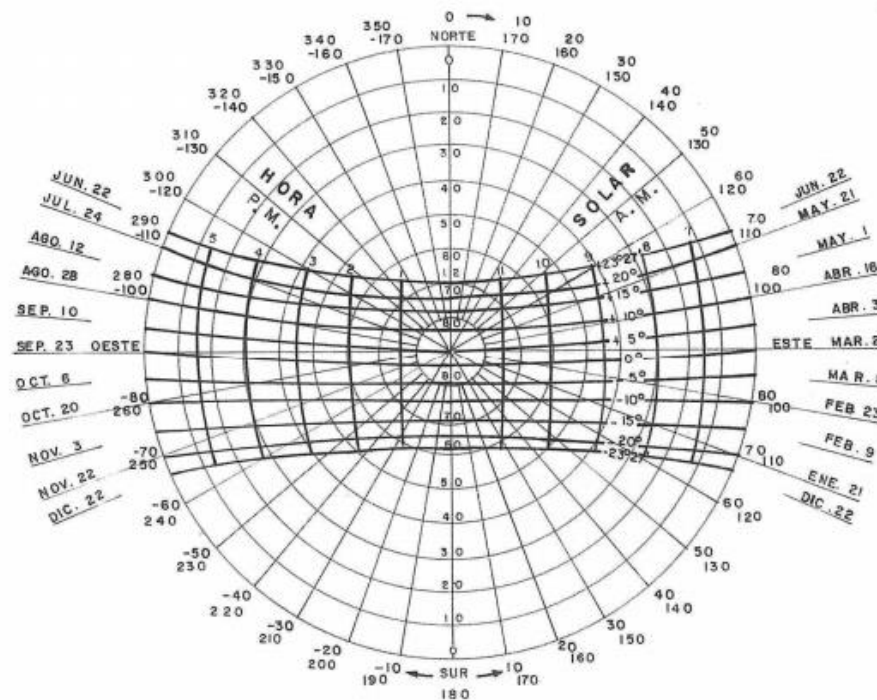
Ilustración 1 Promedio radiación en Bogotá



Fuente [7].

El diagrama de trayectoria para Colombia (), permite conocer la geometría solar para la ciudad, a fin de aprovechar al máximo las condiciones locales y la distribución del elemento, al igual que sus trayectorias en las diferentes épocas del año y sus ángulos acimutales y de altitud sobre la ciudad.

Ilustración 2 Diagrama de trayectoria del sol, Altitud y Acimut para Bogotá



Fuente: [8].

3.2 Desinfección del agua

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de microorganismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella, no todos los organismos se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre desinfección y esterilización [9] [4].

Los procesos de desinfección se dividen en físicos y químicos, los físicos más importantes son el calor (uso de combustible), los rayos ultravioleta (uso de lámpara), SODIS (Es una combinación de calor y rayos ultravioleta, radiaciones solares) y dentro de los químicos están los procesos que involucran halógenos (Cloro, Bromo y Yodo), Plata coloidal y el ozono [10].

3.2.1 Desinfección solar SODIS

El método de desinfección solar usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano.

3.2.1.1 Mecanismos de SODIS

Los microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar: la radiación en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el incremento en la temperatura del agua [11].

La radiación UV-A interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, cambia la estructura molecular y puede producir la muerte de la célula. La radiación UV también reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y produce formas altamente reactivas de oxígenos (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrógeno). Estas moléculas también interfieren con las estructuras celulares y matan a los patógenos.

3.2.1.2 Factores que influyen sobre SODIS

La eficiencia en la desinfección depende de la cantidad de luz solar disponible; sin embargo, la radiación solar se distribuye de manera irregular y su intensidad varía de una ubicación geográfica a otra, dependiendo de la latitud, la estación y la hora del día, también influye la turbiedad, el color, fuentes de reflexión solar.

a) Radiación UV- A y Temperatura

La luz solar desinfecta el agua y elimina a los agentes causantes de la diarrea y otras enfermedades producidas por la contaminación hídrica, gracias a su combinación: la radiación ultravioleta y el incremento de temperatura del agua. Para que el método funcione eficazmente es necesaria una exposición de cinco horas bajo una radiación solar de al menos 500 W/m². Esto se consigue en latitudes

medias con cinco horas de exposición en verano. El efecto conjunto de la temperatura y la radiación se produce cuando el agua supera los 50°C, momento a partir del cual el proceso de desinfección requiere un tercio de la radiación. El agua es apta para el consumo tras una hora de exposición a más de 50 °C [12]. La radiación UV-A, tiene efecto germicida y la temperatura junto con la radiación infrarroja, eleva la temperatura del agua.

b) Color

Las pruebas han demostrado que los altos niveles de color en el agua incrementan el tiempo requerido para la inactivación de los patógenos.

c) Uso de concentradores de la luz solar

Es posible mejorar la eficacia del tratamiento si las botellas de plástico se exponen a la luz solar mediante superficies reflectoras como láminas de aluminio o hierro corrugado. El uso de papel aluminio como reflejante mejora significativamente la desactivación [13].

3.2.1.3 Ventajas

Este proceso brinda grandes ventajas, entre esas la mejora de la calidad microbiológica debido a la combinación de factores existentes que permiten una rápida acción, una de sus grandes ventajas es la sencilla infraestructura. Reduce la necesidad de fuentes tradicionales de energía, como la leña, el kerosén y el gas. En consecuencia, el uso de la desinfección solar reduce tanto la deforestación, un problema ambiental importante en la mayoría de los países en desarrollo, como la contaminación del aire creada por la combustión de fuentes convencionales de energía [12].

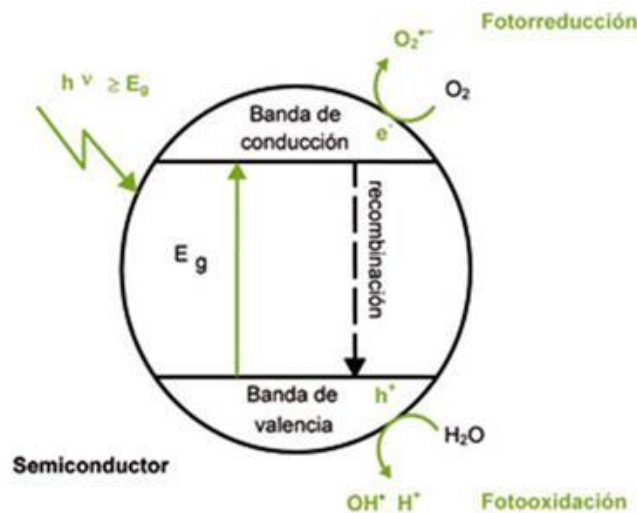
3.2.1.4 Limitaciones de SODIS

- ✓ Requiere suficiente radiación solar y por lo tanto, depende de las condiciones climáticas.
- ✓ Requiere que el agua no esté turbia.
- ✓ No es útil para tratar grandes volúmenes de agua [12].

3.3 Fotocatálisis

La fotocatálisis (Ilustración 3) es un fenómeno por el cual la luz puede reducir la energía de activación de una reacción química. Cuando un semiconductor absorbe un fotón con una energía $h\nu$ igual o superior al valor de su energía de banda de valencia, E_g (que es la energía mínima necesaria para convertir el material en un conductor), un electrón de la banda de valencia se promueve hacia la banda de conducción.

Ilustración 3 Esquema del mecanismo de la fotocatálisis



Fuente: [14]

3.3.1 Potencial de la fotocatálisis para la desinfección del agua

La desinfección solar por fotocatálisis ha sido estudiada como una alternativa para el tratamiento del agua destinada al consumo humano, consiste en la utilización de la radiación ultravioleta que es muy energética y activa un semiconductor, este método puede aplicarse tanto a la destrucción de la población bacteriana como a la eliminación de los subproductos de la desinfección. En éste proceso, la inactivación de bacterias se logra mediante el uso de un semiconductor que en presencia de una fuente de luz, genera especies oxidantes capaces de reaccionar con la membrana celular y ocasionar lisis y posterior muerte del microorganismo.

El TiO_2 es el semiconductor más utilizado en procesos fotocatalíticos debido a que presenta una alta actividad, es económico y no tiene gran impacto al medio ambiente [15].

3.4 Dióxido de Titanio (TiO_2)

El dióxido de Titano (TiO_2) ocurre en la naturaleza en varias formas: rutilo (estructura tetragonal), anatasa (estructura octaédrica) y brookita (estructura ortorrómbica). El dióxido de titanio rutilo y el dióxido de titanio anatasa se producen industrialmente en grandes cantidades y se utilizan como pigmentos y catalizadores y en la producción de materiales cerámicos.

El dióxido de titanio 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

3.4.1 Propiedades

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. Se disuelve en ácido sulfúrico concentrado y en ácido hidrofúrico

3.4.2 Procesos de Oxidación Avanzada

Pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) de potencial de oxidación ($E^\circ = 2.8 \text{ V}$) mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales (ozono 2.07 V, agua oxigenada 1.78 V, dióxido de cloro 1.57 V, cloro 1.36 V, considerado el segundo mejor agente oxidante [24]). Estos radicales al ser agentes oxidantes muy enérgicos, son capaces de oxidar compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres ($\text{R}\bullet$) que reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando un peroxiradical, iniciándose una serie de reacciones de degradación oxidativa que pueden conducir a la completa mineralización del contaminante que se encuentre presente en el agua. Igualmente, los radicales hidroxilos pueden atacar a los anillos aromáticos en posiciones ocupadas por un halógeno. Si bien los radicales hidroxilo tienen una elevada reactividad, sin embargo, su efectividad degradativa no siempre es elevada y pueden producir reacciones lentas con determinadas moléculas como son los compuestos clorados de cadena corta [16].

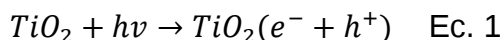
Incluso en los procesos de oxidación avanzada son utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales donde el proceso biológico es ineficiente para la degradación de compuestos orgánicos bio-recalcitrantes (No biodegradados), de hecho hay investigaciones donde se propone la oxidación avanzada como un pretratamiento al proceso biológico [5], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

3.4.3 Fotocatálisis Heterogénea

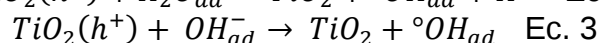
Esta tecnología se basa en la utilización de un material semiconductor como catalizador, el cual es activado por la luz para generar reacciones redox que pueden modificar químicamente los contaminantes, convirtiéndolos en sustancias más biodegradables, o en muchos casos logrando la completa mineralización de los mismos. El semiconductor más utilizado es la forma cristalina anatasa del dióxido de titanio (TiO_2), ya que además de ser el más activo para la fotocatálisis es un material relativamente barato, química y biológicamente inerte y resistente a la fotocorrosión [23], y dado que la fuente de energía del proceso fotocatalítico es la

radiación UV que puede ser aportada por la luz solar, presenta grandes ventajas en cuanto a costos energéticos se refiere, especialmente en Colombia que recibe uno de los mayores niveles de radiación solar en el mundo, con un promedio de irradiación solar global diaria que oscila alrededor de 63,017 Wh/m² [24].

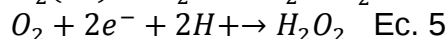
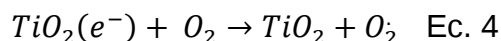
En este esquema, la radiación conduce a la formación de pares hueco-electrón, promoviendo un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción del TiO₂ (ecuación 1).



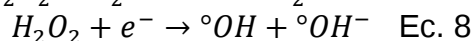
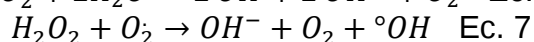
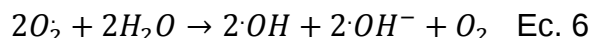
El hueco en la banda de valencia genera radicales hidroxilo cuando una molécula de agua absorbida (ad) en la superficie del catalizador o por oxidación de los iones oxidrilo (ecuación 2 y 3).



Por otra parte, el electrón en la banda de conducción reduce el oxígeno para generar radicales superóxido que pueden ser parcialmente protonados (ecuación 4 y 5).



En donde a partir del peróxido de hidrógeno y del radical superóxido se generan radicales libres mediante las ecuaciones 6 a 8.



Finalmente, la desinfección tiene lugar cuando los microorganismos son atacados por los radicales ${}^\circ OH$ y O_2^- conocidos como especies reactivas de oxígeno (ROS).

3.4.4 Efecto del pH en la desinfección mediante fotocátalisis

“La degradación fotocatalítica de la materia orgánica depende de la dosis de TiO₂ y del pH, donde a bajos valores de pH, lejos del punto isoeléctrico del TiO₂, se obtienen mayores velocidades de degradación. Además, el pH también influye en la adsorción de la materia orgánica en la oscuridad, a bajos valores de pH la degradación se da por la alta adsorción de la materia orgánica, en la superficie del TiO₂, donde hay una preferible adsorción de las moléculas de alto peso molecular, con alta absorción UV y son degradadas a moléculas de bajo peso molecular y baja absorción UV, lo que lleva a que se tenga una selectividad en la degradación fotocatalítica de la materia orgánica y a un pH de 10, donde no hay adsorción de la

materia orgánica , en la oscuridad, la degradación se puede dar debido al fenómeno de fotoadsorción o puede darse un mecanismo indirecto de degradación fotocatalítica” [26].

3.5 Aceite de oliva y de clavo

Se utilizó aceite de oliva y aceite de clavo; para el caso del aceite de oliva virgen es casi el único que contiene cantidades notables de sustancias fenólicas naturales, dado que el resto de aceites comestibles al consumirse refinados pierden estos compuestos. Por este motivo, el aceite de oliva virgen posee un sabor característico imperceptible en el aceite refinado, tiene propiedades antioxidantes las cuales serían el motivo de sus posibles implicaciones en la salud humana, como son la prevención del cáncer, de las enfermedades cardiovasculares o incluso de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer. Como hemos comentado anteriormente, también existen sustancias con actividad estrogénica (fitoestrógenos) como las isoflavonas, los lignanos y el estilbeno resveratrol, y otras con propiedades antimicrobianas [27].

Para el aceite de clavo, en altas concentraciones tiene un efecto bactericida, acción que se ha atribuido a los fenoles por degeneración de las proteínas, lo que resulta en daño a la membrana celular, a diferencia de que en bajas concentraciones tiende a estabilizar las membranas celulares [28].

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la configuración más efectiva en la potabilización del agua mediante fotocátalisis, logrando que sea apta para el consumo humano, teniendo en cuenta radiación UV y Compuesto foto-oxidante.

4.2 Objetivos específicos

- Diseñar el experimento teniendo en cuenta la confiabilidad de los datos para hacer las combinaciones de factores y replicas
- Determinar técnicas para la definición de indicadores específicos en el sistema que permitan la caracterización de cada proceso
- Elaborar un método de optimización simple para determinar la combinación de variables de control determinantes en el agua

5 JUSTIFICACIÓN

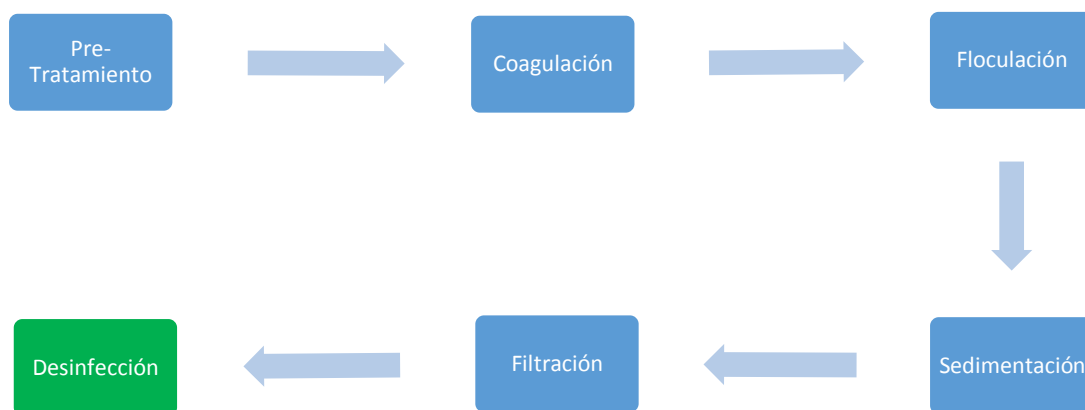
Esta investigación tiene como fin aportar solución a una parte del problema de necesidades básicas en Colombia, el acceso a agua potable en diferentes zonas del país, dando un aporte o alternativa para la etapa de desinfección. Al encontrarse varias familias que no cuentan con este recurso viéndose obligadas a arriesgar su salud al tomar el agua directamente de los cuerpos hídricos [1], cuando no tienen servicio de alcantarillado y acueducto, se validará la potabilización y la etapa de desinfección del agua mediante radiación solar, es un método económico y sencillo que cualquier familia puede realizar en su hogar.

Para la ingeniería ambiental es importante hacer un uso racional de los recursos naturales como también generar alternativas limpias y no costosas que permitan dar solución a problemas como el ya mencionado, el óxido de titanio es hoy en día un compuesto primordial y de gran impacto para lograr unas características fisicoquímicas aptas para el consumo mediante tratamientos no convencionales pero factibles para las poblaciones afectadas.

6 DELIMITACIÓN

El alcance del proyecto será un análisis de laboratorio de las condiciones aptas para consumo humano según la resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano para este caso se evaluaron algunas características físico-químicas y microbiológicas las cuales son presentadas en la metodología. La investigación de este proyecto sólo trabajará en la etapa de desinfección del tratamiento de potabilización de agua como un complemento alternativo de este proceso, se tomaron muestras de agua de la quebrada la Vieja debido a su cercanía y facilidad para la recolección de las muestras, además de esto nace en los cerros orientales por lo que tiene gran variedad de vegetación y fauna y sus características se asemejan a la posible fuente de aprovechamiento en una zona rural ya que es cercana a viviendas y puede tener parámetros fuera de lo establecido sin presentar altos índices de contaminación, y agua cruda de pecera presente en el laboratorio la cual tiene presencia de microorganismos y crecimiento de los mismos constantemente, además de turbiedad ; se hicieron los ensayos y estudios en el laboratorio de la Universidad Santo Tomás. A continuación (Ilustración 4) se expone una gráfica del sistema convencional de potabilización.

Ilustración 4 Esquema del sistema de potabilización de agua convencional



Fuente: Adaptado de [29]

Este proyecto solamente plantea una alternativa para el proceso de desinfección, en la que implementamos el método de fotocátalisis mediante TiO_2 . Al finalizar el proyecto se presentará un diseño experimental que incluye el método más viable, como alternativa para la potabilización de agua de zonas rurales de Colombia. Se busca estudiar y determinar las condiciones físico-químicas del agua mediante el

tratamiento que se implementará, teniendo en cuenta los diferentes ensayos que se realizaron.

Se realizó una propuesta de validación, impacto ambiental y la caracterización inicial de las condiciones físico-químicas del agua, que servirá como modelo para diferentes zonas rurales donde carezcan de agua potable.

7 DESARROLLO CENTRAL

7.1 Metodología

7.1.1 Evaluación de condiciones iniciales: *Clasificación de aspectos a evaluar según normativa*

Para la realización del proyecto (Tabla 1) se procedió a clasificar las características respecto a la resolución 2115 de 2007, dichas características se escogieron teniendo en cuenta el artículo 13 el cual establece el índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano, de todos los mencionados en dicho artículo se escogieron 4 parámetros y se anexaron potencial de óxido reducción (debido a su analogía con el pH), conductividad y sólidos disueltos.

Para el caso de potencial de óxido reducción se tuvo en cuenta el valor establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para conductividad la resolución establece valores menores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por ende el valor para sólidos totales será menor a 500 ppm.

Tabla 1 Parámetros medidos en este estudio

Características		
Físicas	Unidades	Valor aceptable
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Potencial de óxido reducción	mV	600 a 700
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Menor a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
pH	NA	6,5 a 9,0
Sólidos totales disueltos	ppm	Menor a 500 ppm
Microbiológicas	Unidades	Valor aceptable
Presencia de coliformes en el agua	Presencia o ausencia	Ausencia
Químicas	Unidades	Valor aceptable
Dureza	mg CaCO_3/L	300 mg/L

7.1.2 Ensayos de calibración y conocimiento de equipos

Para iniciar con el ensayo práctico, se tomaron muestras patrón de agua potable del grifo y se midieron con Buffer pH 4 y 7, con el fin de calibrar el pH-metro (Error!

Reference source not found.) Para el proyecto se midieron los siguientes con la sonda Multiparametro Hanna hi 9829 (Ver Anexo No. 1):

Físicas

- Potencial de óxido reducción
- Conductividad
- pH
- Sólidos totales disueltos

Para el caso de olor y sabor, se realizó un análisis organoléptico.

Ilustración 5 Calibración de equipos en laboratorio



Estos ensayos se realizaron con el fin de determinar la factibilidad del óxido para regular el pH del agua, el cambio en la conductividad, la incidencia del TiO_2 (ver Anexo No. 2), y exposición UV en los demás aspectos físicos.

Se ensayaron diferentes concentraciones durante el montaje en laboratorio. Teniendo en cuenta la calibración del equipo se hizo una mezcla para tomar datos de referencia, se utilizaron 100 mL de agua potable mezclada con residuos de materia orgánica (18 mg/200 mL de jugo instantáneo comercial), se tomaron datos inmediatos con la sonda Multiparámetro (Ilustración 6).

Al realizar ensayos de calibración y obtener los datos iniciales, se le adicionó a cada muestra 3 cantidades de TiO_2 con una exposición a luz UV-A de 5 minutos y 20 minutos. Se midieron los parámetros que se muestran en la Tabla No 2:

Tabla 2 Tiempos de muestreo

<i>Tiempo de exposición</i>	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Concentración	Sin TiO₂	0,07g TiO₂	0,2 g TiO₂	2 g TiO₂
pH			-	-
Conductividad			-	-
Sólidos totales			-	-

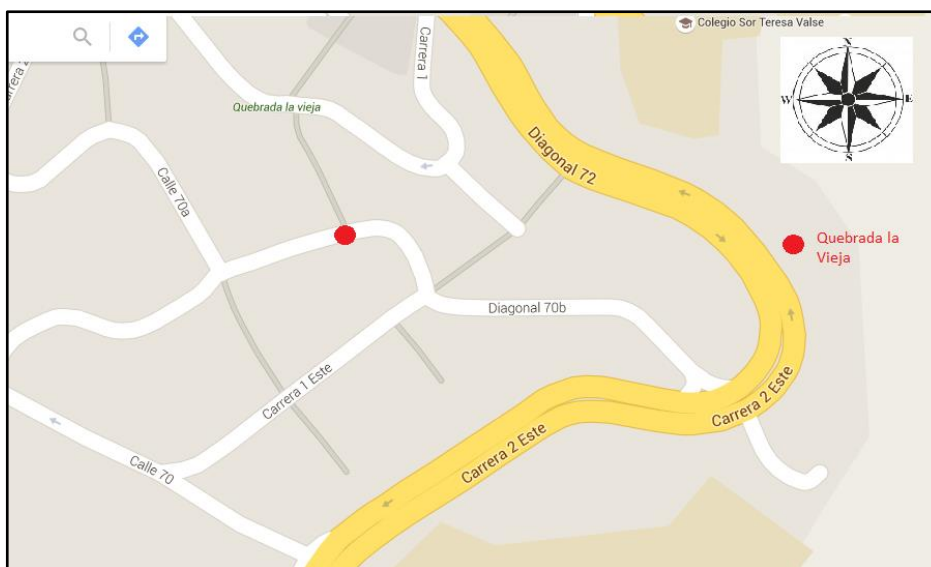
Ilustración 6 Ensayo de referencia



7.2 Recolección de la muestra

El muestreo fue realizado en la quebrada la vieja cercana a la calle 72, Se encuentra en la localidad de Chapinero, en el Piedemonte Occidental de los Cerros Orientales, localizada de oriente a occidente, cruzando la avenida circunvalar, finalizando en la carrera tercera con calle 51, terminando su recorrido en Chapinero Alto, naciendo a una altura aproximadamente de 3275 msnm, en áreas denominadas como reserva forestal (Ilustración 7). [29].

Ilustración 7 Ubicación de lugar de recolección de la muestra



Fuente: Adaptado de [31]

7.3 Fase 1: Montaje de botellas de vidrio

Se trabajó con dióxido de titanio Anatase, se escogieron las concentraciones de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos iniciales. Se procedió a pesar en laboratorio con una balanza analítica marca OHAUS Explorer; modelo PIONEER; de precisión de $\pm 0,1$ mg [32].

Posterior al pesaje se realizó el montaje con base de láminas en policarbonato formando un triángulo equilátero, con el fin de exponer la totalidad de las botellas a la radiación, ubicándolo de frente a los cerros orientales con una inclinación de 10° al sur teniendo en cuenta la posición solar para la fecha del primer montaje y para el segundo, 5° también al sur respecto al oriente, esto con el fin de exponer todas las botellas a la radiación solar del día. (Ver Anexo No. 3) (Ver Anexo No. 4)

Al tener las concentraciones pesadas se procede al montaje en dos épocas diferentes de 6 grupos, cada uno con 5 repeticiones de botellas de vidrio limpias con 180 mL de agua como se muestra en la **Error! Reference source not found.**

7.4 Diseño experimental

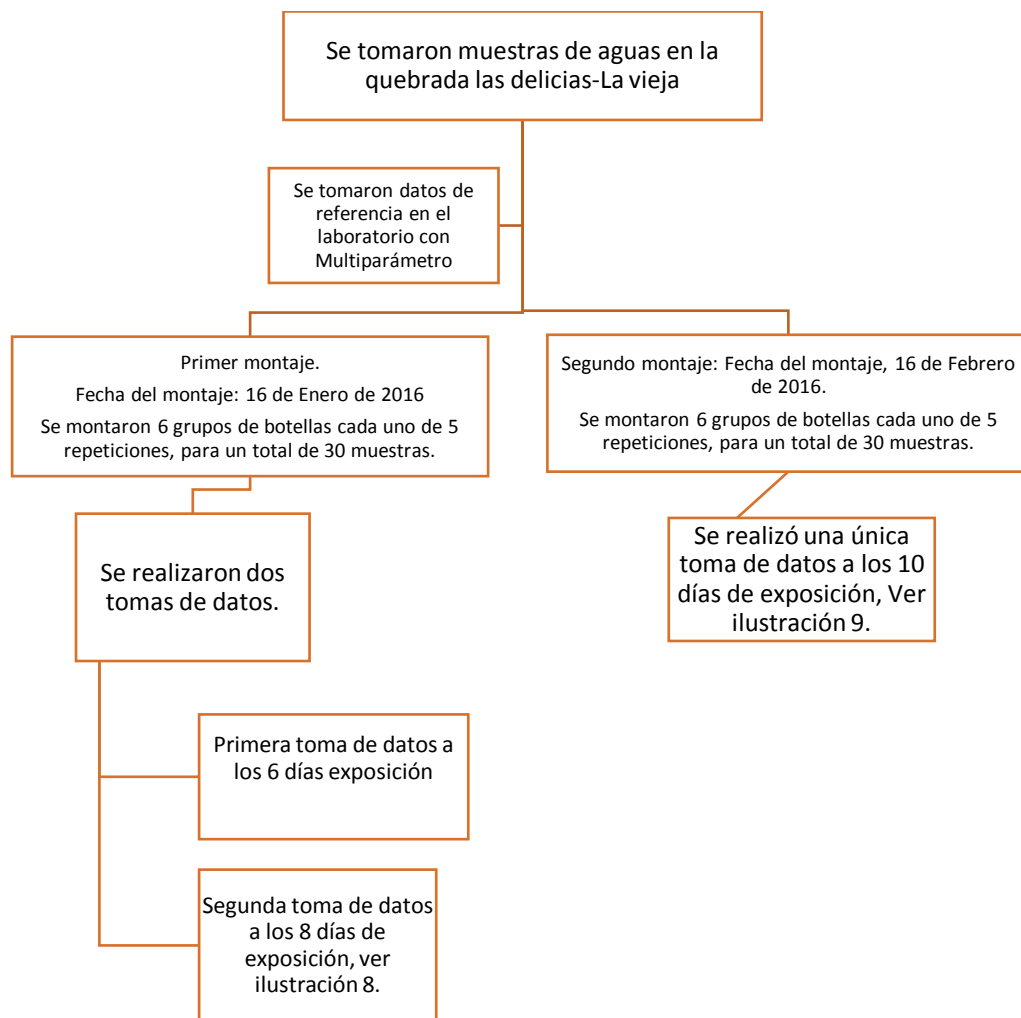


Tabla 3 Grupos de muestreo y repetición

Grupo	Concentración g/180mL	Número de botellas	Recubierta (pintura negra)	Sin recubrir
1	0,01	5	1	4
2	0,05	5	1	4
3	0,07	5	1	4
4	0,1	5	1	4
5	1	5	1	4
Control	0	5	1	4

Ilustración 8 Montaje en proceso



Después de la primera toma no se desechaba la muestra ya que esta fue expuesta dos días más para determinar si existía algún cambio en los datos o si la sedimentación del TiO_2 era la misma (Ilustración 9)

Ilustración 9 Toma de datos en laboratorio (8 días exposición)



Al completar los 8 días de exposición se desecharon las 30 muestras del primer montaje, se recolectaron nueva muestras en la quebrada y se procedió a realizar un segundo montaje, con las mismas combinaciones del primero, este se expuso 10 días a la radiación solar y se hizo toma de datos con la sonda multiparámetro.

7.5 Fase 2: Ensayos para *E. coli*

Posterior al montaje con radiación solar se tomó nueva muestra de agua para hacer el montaje con lámparas UV dentro del laboratorio, se evaluaron las características físico-químicas elegidas y se hizo cultivo para determinar la presencia de coliformes en el agua.

Se realizó cultivo con agar Lauril sulfato con Mug, este medio cuenta con todas las condiciones para que las bacterias crezcan, este caldo tiene un compuesto fluorogénico 4 Metil Umbeliferil Beta D Glucurónido (MUG) que permite la detección directa de *E. coli*. La enzima Beta Glucuronidasa, presente en el 97% de las cepas de *E. coli*, hidroliza el MUG presente en el medio, liberando el compuesto 4 Umbeliferona, fuertemente fluorescente cuando se observa en la oscuridad bajo luz ultravioleta permite determinar la presencia de la cepa [33].

7.5.1 Montaje de muestras en laboratorio

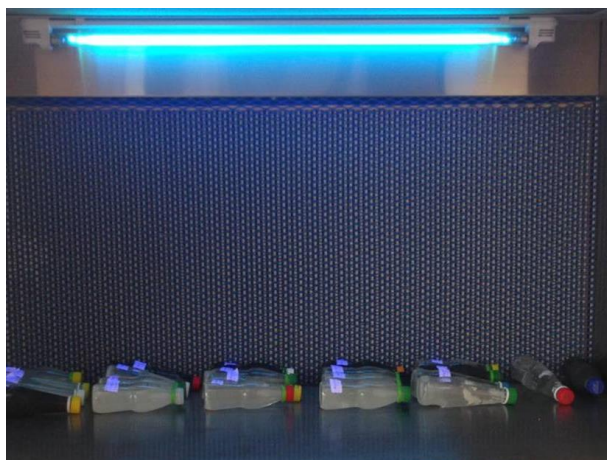
Se preparó el medio de cultivo en viales con 1,5 g de medio Lauril sulfato con Mug con 50 mL de muestra de referencia y se llevó a incubar durante 24 horas a 37°C, se utilizaron botellas de vidrio con un volumen nominal de 60 mL previamente esterilizadas a 150 °C para los cultivos (Ilustración 10).

Ilustración 10 Medio de cultivo



Posteriormente se tomaron 30 botellas de vidrio (Ilustración 11), cada una con 180mL de muestra; se hicieron las combinaciones respectivas con la concentración elegida (**Error! Reference source not found.**) y se expusieron en la lámpara UV simulando la radiación solar, esto con el fin de determinar la factibilidad del dióxido para remover coliformes mediante fotocátálisis.

Ilustración 11 Muestras expuestas en lámpara UV



Después de expuestas las botellas se tomaron características físico-químicas y se realizó cultivo en los viales con Lauril sulfato-Mug, tomando una muestra por grupo cada dos horas hasta completar las 30 botellas expuestas, teniendo así 30 cultivos, con su respectiva etiqueta (Ilustración 12)

Ilustración 12 Muestras etiquetadas



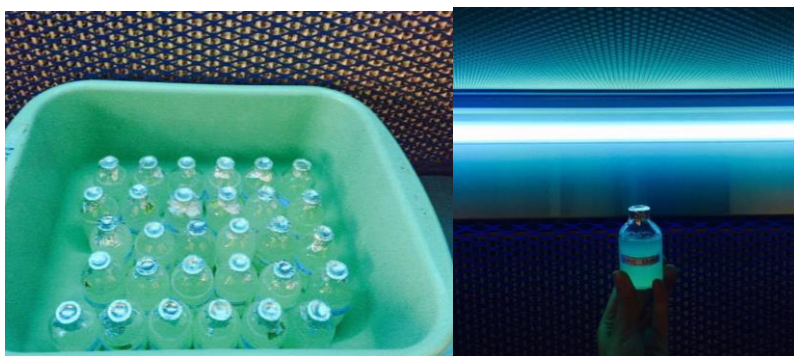
Tabla 4 Toma de datos por tiempo de exposición

Tiempo de exposición	Concentración					
	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1,0 g/180mL	Control
2 horas	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra
4 horas	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra
6 horas	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra

8 horas	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra
10 horas	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra	1 muestra

Pasadas las 24 horas se retiraron las muestras y se pusieron en lámpara UV (Ilustración 13) para comprobar la presencia o ausencia de coliformes mediante fluorescencia.

Ilustración 13 Muestras bajo lámpara UV



7.6 Fase 3: Inmovilización de TiO_2 en las muestras

Debido a los datos obtenidos en las dos primeras fases se decidió hacer una inmovilización del dióxido para así ayudar el paso de la luz, evitar la dispersión del TiO_2 en el agua y la coloración de esta por la agitación o movimiento de la muestra; para esto se utilizaron siete tubos de ensayo con 20 mL de muestra de agua de pecera, cada uno de la manera que se presenta en la **Error! Reference source not found.**:

Tabla 5 Planteamiento de tubos de ensayo

Tubo	Concentración	Tratamiento utilizado
Número 1	1g/20mL	Aceite de clavo
Número 2	1g/20mL	Aceite de clavo
Número 3	1g/20mL	Aceite de Oliva
Número 4	1g/20mL	Aceite de Oliva
Número 5	1g/20mL	Deposición seca
Número 6	1g/20mL	Deposición seca
Número 7	0g/20mL	Control

7.6.1 Inmovilización del dióxido mediante aceite de oliva y de clavo

Se preparó una mezcla con una proporción de 5 mL de cada uno de los aceites (oliva y clavo) y 10 gramos de dióxido para obtener un material homogéneo y fácil de manejar; se formaron esferas pequeñas para luego secarlas a 50°C durante 30 minutos, retirando la humedad.

Se agregó 1 gramo de estas por tubo, completando así los 4 tubos con aceite.

7.6.2 Inmovilización de aceite mediante deposición seca

Se inmovilizo el dióxido de tal forma que este quedará adherido a las paredes del tubo y así evitar su disolución en el agua, para esto se añadió 1 gramo de TiO_2 en seco al tubo y se llevó a secado en el horno a 100°C durante 30 minutos, teniendo así dos tubos con deposición seca, más el control el cual no lleva concentración de dióxido.

7.7 Fase 4: Exposición tubos de ensayo a lámpara UV

Después de hacer la inmovilización se expusieron los 7 tubos de ensayo a la lámpara UV. Para la toma de muestras se expusieron los tubos durante 4 horas, sacando un tubo por tratamiento cada hora y sembrando en las condiciones de asepsia requeridas, retornando el tubo a la lámpara para tomar la muestra correspondiente a la siguiente hora y así sucesivamente hasta completar las 4 retirando los tubos por completo.

7.7.1 Preparación de cajas de Petri y medio para la siembra

Se utilizaron 32 cajas de Petri previamente esterilizadas, en cada caja se inoculó 0,1 mL de muestra proveniente de cada botella. Para el medio de cultivo se utilizó Agar Eosin methylene blue (E.M.B) en soluciones de 50 gramos de medio por cada 20 mL de agua destilada en 4 erlenmeyer de 50 mL cada uno, se llevo la preparación a baño maría hasta ebullición, posteriormente al horno para esterilizar durante 20 minutos a 130°C, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se sirvió en las 32 cajas.

7.8 Fase 5: Exposición de botellas pet a lámpara UV

7.8.1 Exposición de botellas con muestra de agua de pecera

Después de evaluar los posibles tratamientos con aceite y deposición seca, se escogió el aceite de oliva por sus propiedades digestivas y por la economía para ser utilizado.

Se tomó agua de pecera del laboratorio para realizar ensayos en botellas pet de 3 litros **Error! Reference source not found.** y en cada botella se vaciaron 1,5 litros de agua con diferentes concentraciones. Estas botellas fueron expuestas durante 24 horas a la lámpara UV, retirándolas cada dos horas para realizar muestreo y sembrar en las cajas de Petri (Ilustración 14).

Tabla 6 Muestras para ensayo en pet

Muestras	Concentración
Botella número 1	10g/1,5L
Botella número 2	50g/1,5L
Botella número 3	100g/1,5L
Botella número 4	Control

Ilustración 14 Montaje en laboratorio



7.8.2 Exposición de botellas a Radiación Solar con muestra de agua de la quebrada y de pecera

Para esta última exposición se realizaron dos muestras para cada concentración como se muestra en la **Error! Reference source not found.**

Tabla 7 Muestras para ensayo

Muestra	Fuente de agua	Concentración
1	Pecera	10g/1,5L
2	Quebrada	10g/1,5L
3	Pecera	50g/1,5L
4	Quebrada	50g/1,5L
5	Pecera	100g/1,5L
6	Quebrada	100g/1,5L
7	Pecera	Control
8	Quebrada	Control

Se expusieron las botellas durante 3 días al sol directo, se pusieron sobre láminas de aluminio para así reflejar mayor cantidad de luz sobre las botellas, se realizó el mismo procedimiento que en las fases anteriores, se tomaron 10 mL de la muestra y se sembraron en cajas de Petri para dejar incubando durante 24 horas. Se realizaron dos únicas mediciones; al primer y al tercer día de exposición, para este caso se volvieron a tomar datos físico-químicos y así corroborar lo obtenido durante la primera fase.

7.9 Análisis estadístico

Este análisis se aplicará mediante la herramienta ANOVA del software estadístico IBM SPSS.

7.9.1 Análisis de varianza

Para analizar el efecto del tratamiento con TiO_2 y al mismo tiempo confirmar cuál es el efecto de las concentraciones utilizadas para cada grupo en las fases del proceso del proyecto, se hizo un análisis de varianza. Este análisis nos permitió distinguir los efectos principales de cada concentración, con cada una de las variables elegidas [34]. Para hacer el análisis de varianza de un factor por cada variable dependiente, con el programa IBM SPSS.

El análisis de varianza es una técnica para análisis de datos, donde se prueba la hipótesis nula que “todos los tratamientos son iguales, contra la hipótesis alternativa que “al menos uno de los tratamientos es distinto a los demás, para relacionar entonces los tratamientos se hará una prueba de medias por el método Tukey, se hará entonces un reporte de la significancia comparando cada uno de los tratamientos para este caso las concentraciones mediante la tabla **Error! Reference source not found..**

Tabla 8 Cuadro base para la relación de significancias

	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1 g/180mL	Contr ol
0,01 g/180mL						
0,05 g/180mL						
0,07 g/180mL						
0,1 g/180mL						
1 g/180mL						
Control						

Al final se resaltar  en rojo aquellos datos que est n por debajo de 0,05 (indicando que las diferencias fueron significativas) ya que este fue el valor que se utilizó en SPSS para realizar el análisis multivariable.

8. IMPACTO SOCIAL

El proyecto pretendió evaluar un método de desinfección para el agua, económico y sencillo, para aquellas familias que no cuenten con el servicio de acueducto fácil de divulgar en la comunidad mediante programas establecidos por la autoridad competente. El 28 % de la población rural de Colombia enfrenta una situación crítica por la falta de acueducto, según informe del DANE al menos 3 millones de personas carecen del servicio, las zonas más afectadas son el atlántico y pacífico colombiano

Mediante la utilización de dióxido de titanio se evita el uso de cloro lo que evita residuos del mismo en el agua, es un método que puede ser implementado por familias de zonas rurales que requieran potabilizar el agua para consumo de manera económica y rápida. Una familia podrá potabilizar aproximadamente 10 litros de agua con sólo 150 gramos de dióxido exponiendo los recipientes durante 24 horas al sol, es clave resaltar que un kilo de dióxido de titanio anatase cuesta \$6800 pesos, lo que indica una sola compra se pueden potabilizar más de 60 litros de agua.

Esta cifra, que equivale por lo menos a 3,1 millones de colombianos, tiene en el Atlántico y el Pacífico a las regiones con mayor población carente del servicio, puede ser una alternativa para la desinfección remplazando el cloro y los peligros para la salud que este trae. La presente investigación no sólo fue base de los ensayos de potabilización, también hará un aporte a aquellos que quieran profundizar en el tema de tratamiento de fuentes hídricas y nuevas metodologías para el tratamiento de agua potable, estableciendo la mejor técnica o combinación para dicho tratamiento teniendo como base la fotocatalisis.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

9.1 Resultados de los datos de calibración y referencia

9.1.1 Datos de calibración

En la tabla No. 9 se presentan los datos de calibración para el pH-metro, los valores permitieron detectar y ajustar la desviación que tenían el equipo.

Tabla 9 Datos de calibración

	Patrón (4) pH	Patrón (7) pH
pH	4,25	7,26

En la Tabla No. 10 se observan los datos obtenidos como referencia de la quebrada. Según la resolución 2115 de 2007, para pH el dato está por debajo del nivel aceptable, para potencial redox el valor está por debajo del nivel establecido por la OMS, para sólidos totales y conductividad los datos son aceptables.

Tabla 10 Datos de referencia fisico-químicos de la quebrada

Parámetros	Resultado
pH	5,6
Conductividad	96 $\mu\text{s/cm}$
Potencial Redox	187 mV
Sólidos totales	45 ppm

Al realizar ensayos de calibración y referencia los resultados obtenidos muestran (Tabla 11) como la concentración de TiO_2 permite regular el nivel de pH en el agua debido a su carácter anfótero [35]. El dióxido tiene una alta capacidad de óxido reducción que al contacto con la luz genera radicales hidroxilo haciendo así que este potencial aumente gracias a la concentración añadida, los sólidos aumentan ya que la sonda multiparámetro mide este parámetro por la cantidad de partículas disueltas en el medio y al no inmovilizar el dióxido este queda suspendido en la solución.

Tabla 11 Ensayos de referencia con concentraciones de TiO_2

<i>5 Minutos</i>	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Concentración	Sin TiO_2	0,07g TiO_2	0,2 g TiO_2	2,0 g TiO_2
pH	7,46	7,57	6,6	6,78

Conductividad	199 μs/cm	190 μs/cm	230 μs/cm	245 μs/cm
Potencial Redox mV	204	298	200	210
Sólidos totales	90 ppm	87 ppm	44 ppm	98 ppm
<i>20 Minutos</i>	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Concentración	Sin TiO ₂	0,07g TiO ₂	0,2 g TiO ₂	2,0 g TiO ₂
pH	6,9	7,2	6,3	7,0
Conductividad	305 μs/cm	345 μs/cm	340 μs/cm	285 μs/cm
Potencial Redox	190 mV	191 mV	200 mV	206 mV
Sólidos totales	90 ppm	87 ppm	44 ppm	56 ppm

9.2 Fase 1: Montaje en botellas de vidrio: Análisis del efecto de cada concentración sobre las variables estudiadas

En la Tabla No. 12 se muestran los resultados de la fase 1, correspondientes al primer y segundo montaje; según la resolución 2115 de 2007 el dato de pH está por debajo del nivel aceptable, para conductividad y sólidos totales el dato es aceptable; mientras que para Redox el dato está por debajo del nivel que entrega la OMS.

Tabla 12 Resultados de datos de referencia

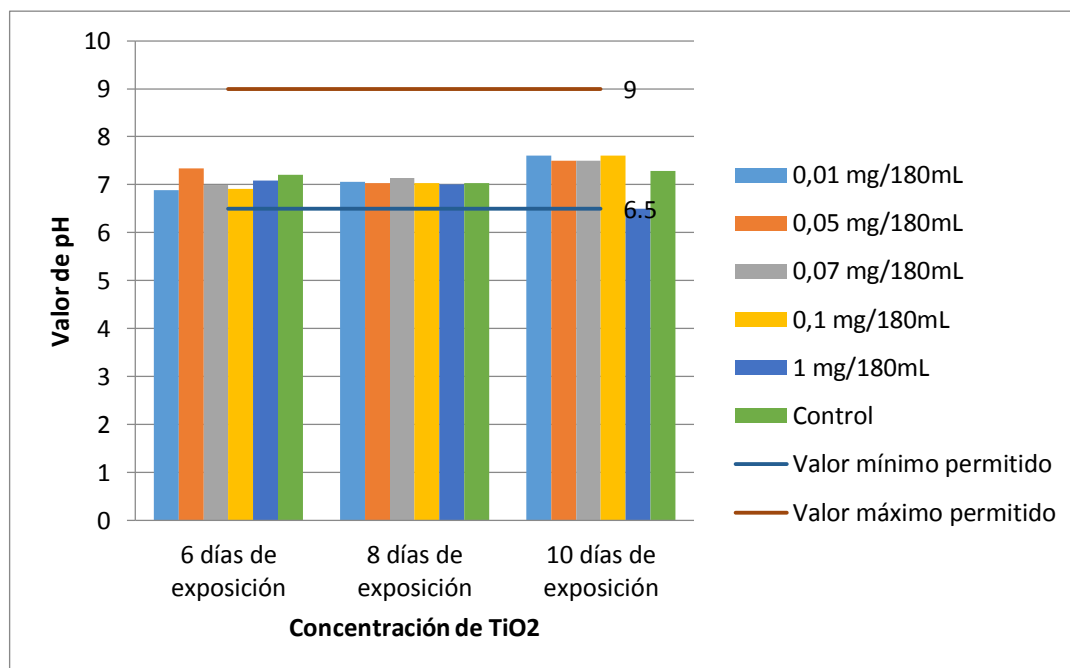
Primer montaje		Segundo Montaje	
Parámetros	Resultado	Parámetros	Resultado
pH	5,77	pH	5,48
Conductividad μS/cm	604	Conductividad μS/cm	120
Solidos Disueltos ppm	309,5	Solidos Disueltos ppm	60
Potencial Redox ORP mV	195,3	Potencial Redox ORP mV	209,8

9.2.1 Datos obtenidos con muestras cubiertas

Al promediar el resultado de las variables a tratar para cada concentración, se pueden observar los datos obtenidos teniendo en cuenta el tiempo de exposición a

la radiación solar y el valor de referencia establecido por la norma para determinar si hay o no cumplimiento. En la Ilustración 15 se muestran los datos obtenidos para pH en las muestras cubiertas, teniendo en cuenta el tiempo de exposición y la concentración utilizada. Para todos los tratamientos el pH se estabilizó cumpliendo así con la norma, presentaron niveles por encima del control, teniendo en cuenta el dato de referencia de la muestra el cual fue de 5,26 pH en promedio.

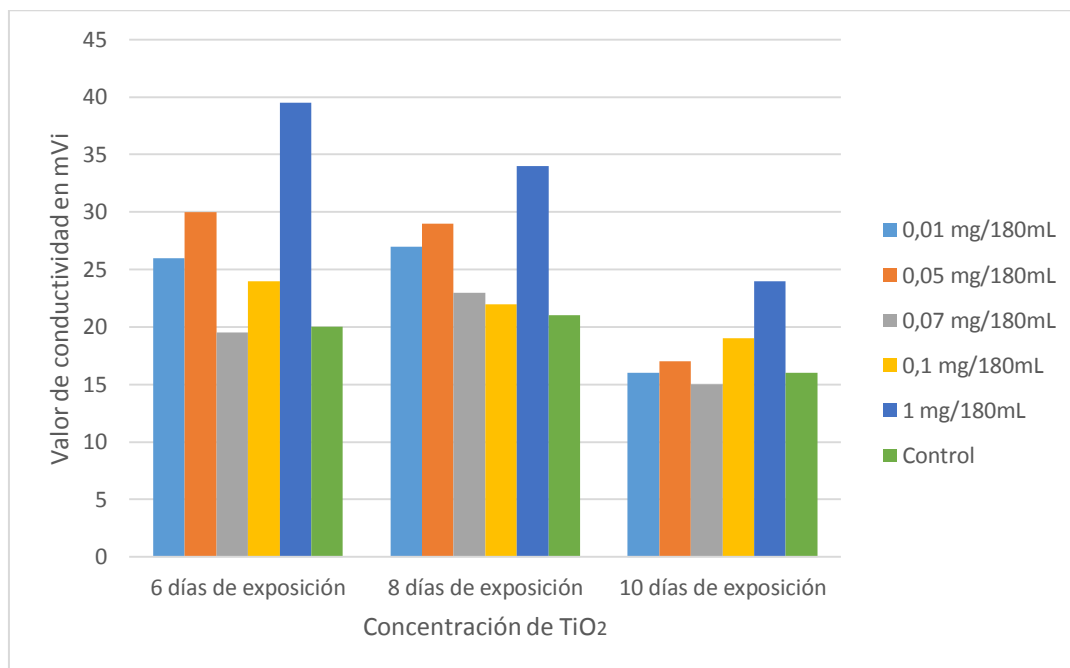
Ilustración 15 Gráfica de pH para muestras cubiertas



En la Ilustración 16 podemos observar los datos obtenidos para conductividad, la norma específica agua para consumo cuando este valor está por debajo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sin embargo entre más bajo sea indica menos sólidos disueltos y contenido de sal en el agua, haciéndola de mejor calidad, en la gráfica los datos son menores a 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

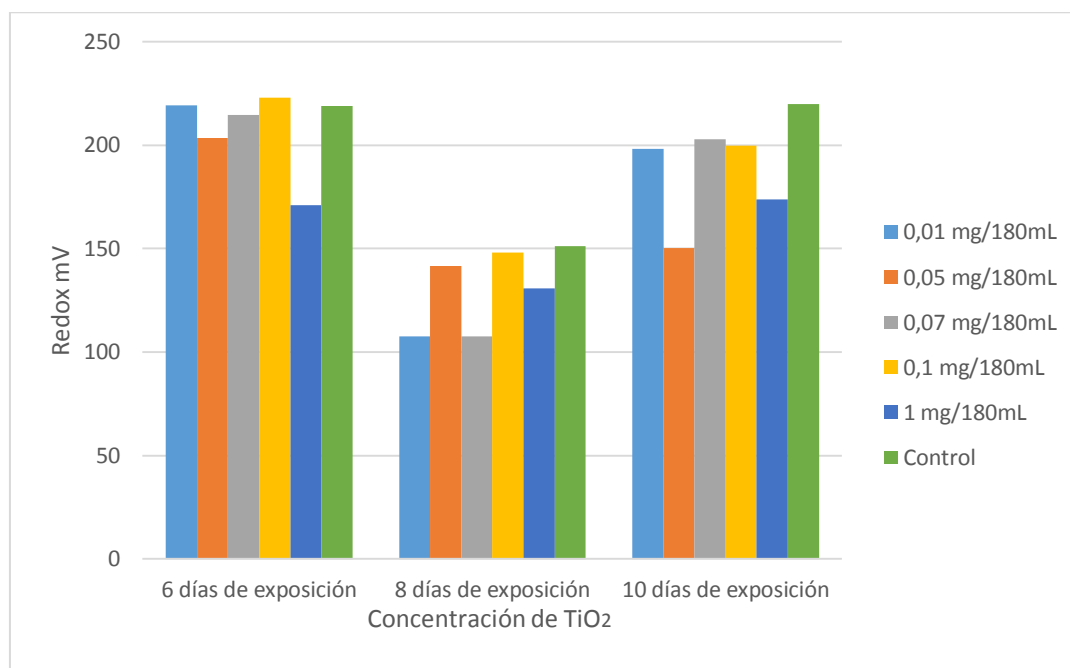
Los datos de referencia arrojaron valores por encima de 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando así mayor cantidad de sales disueltas, al tratar el agua con las diferentes concentraciones y recubierta de negro, se puede decir entonces que el dióxido incide en el valor obtenido, la concentración óptima de dióxido será 0,07 g/180mL recubriendo la botella debido a los sólidos disueltos que se pueden presentar, sin embargo no se descarta el tratamiento control a 10 días de exposición para obtener valores de menos de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A mayor tiempo de exposición mayor es la sedimentación de sólidos en el agua disminuyendo también la conductividad.

Ilustración 16 Gráfica de conductividad para muestras cubiertas



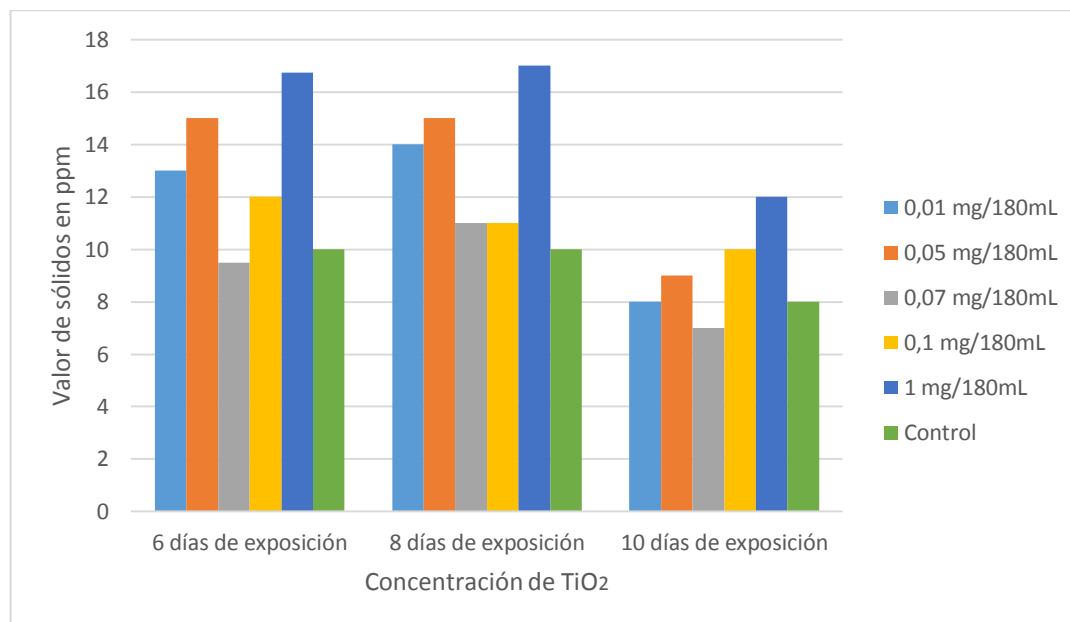
En la Ilustración 17 se observa como el potencial de óxido reducción en cada concentración arrojó valores por debajo de 250mV, aunque la resolución 2115 de 2007 no menciona dicho potencial, es claro que tiene directa relación con el oxígeno presente en el agua, variable indicativa de calidad. Por esto se tomó como dato de referencia el valor entregado por la OMS, la cual presenta como rango optimo un promedio de 650mV para declarar agua potable fiable; sin embargo no descarta valores por debajo de 1000 mV como aceptables, para esto se puede decir que el TiO₂ no afecta el aumento de dicha variable, pues los datos de referencia arrojan valores de 200 mV en promedio. Cabe aclarar que para 6 días de exposición los datos alcanzaron valores de 230 mV, para el tratamiento control los datos obtenidos fueron iguales en comparación a las concentraciones elegidas, indicando así que el TiO₂ regula el potencial ya que para el proceso de óxido reducción la radiación actúa activando el catalizador (TiO₂) teniendo en cuenta que todas las muestras estaban recubiertas absorbiendo así más calor.

Ilustración 17 Gráfica de potencial de óxido reducción para muestras cubierta



Según la resolución 2115 los sólidos disueltos (ilustración 18) suelen ser un medio de la conductividad del agua, afirmación que se corroboró en la toma de datos con el multiparámetro, se podría decir entonces que si el valor máximo de conductividad es de 1000 μ S/cm el valor máximo de sólidos totales deberá ser 500ppm; en la Ilustración 19 vemos como el valor de sólidos disueltos está por debajo de 15ppm, dato que estaría dentro del rango permitido, también se observa que a mayor tiempo de exposición es menor el valor de ppm dado que la sedimentación aumenta, la efectividad del tratamiento disminuye al aumentar el contenido de sólidos suspendidos. Se ve una clara diferencia entre 8 y 10 días de exposición. Se asume que el valor de sólidos disminuye notablemente debido a la sedimentación durante los días de exposición.

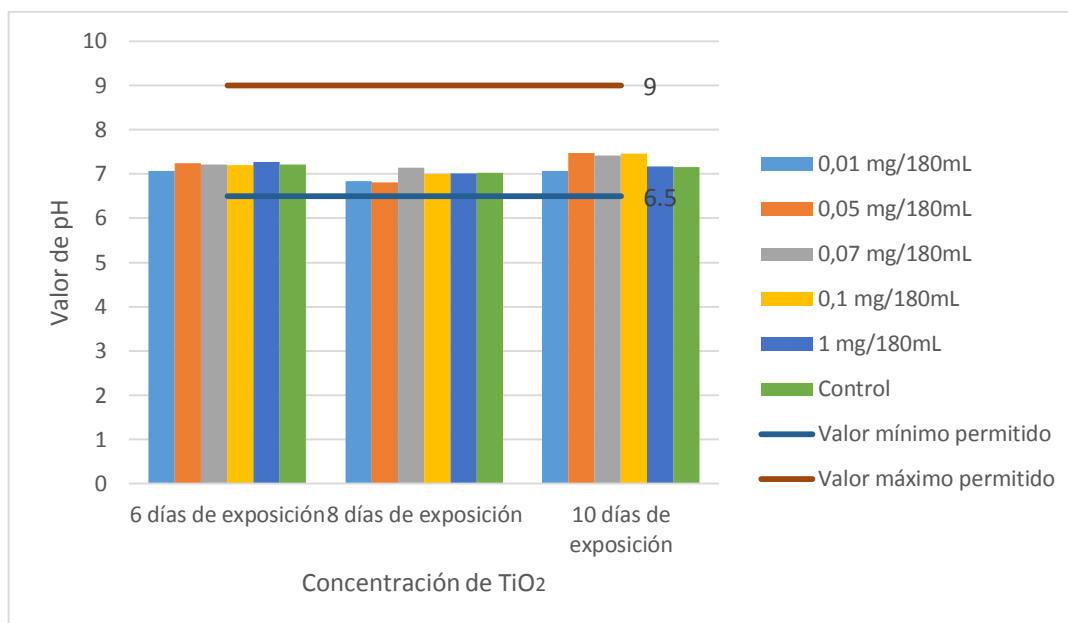
Ilustración 18 Gráfica de sólidos totales para muestras cubiertas



9.1.3 Datos obtenidos para muestras sin cubrir

En la Ilustración 19 observamos los datos de pH obtenidos para cada concentración sin recubrir las botellas, el tiempo de exposición para este caso no influye ya que los 3 periodos elegidos presentan valores similares, para el caso de las concentraciones y el control ocurre lo mismo, concluyendo así que el dióxido no influye en el pH, ahora al comparar con los datos obtenidos para las muestras cubiertas se puede observar que el recubrir la botella obtenemos datos más cercanos al promedio exigido por la norma.

Ilustración 19 Gráfica de pH para muestras sin cubrir



En la Ilustración 20 se observan los datos obtenidos para conductividad en cada concentración sin recubrir las botellas, teniendo en cuenta los datos de referencia ya mencionados dicho valor disminuyo de manera significativa, a mayor tiempo de exposición menor es el dato ya que así mismo los sólidos se sedimentan, para el tratamiento control se obtiene datos menores en los 3 periodos.

Al realizar la prueba Tukey y las comparaciones entre el tiempo de exposición vemos como en el potencial de hidrogeno la significancia está por debajo de 0,05 en la relación de 8 días con 6 y 10 días (Tabla No. 13)

Tabla 13 Significancia del tiempo de exposición para pH

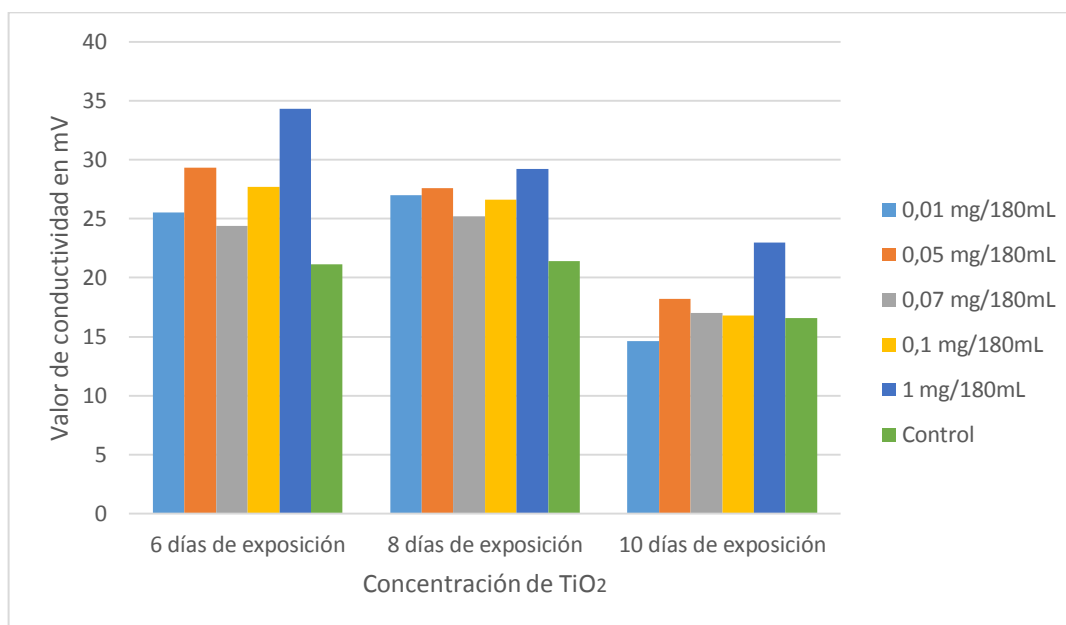
Prueba de Tukey			
	6 días	8 días	10 días
6 días		0,002	0,302
8 días	0,002		0
10 días	0,302	0	

Para la tabla No. 14 observamos la significancia de las diferencias entre los datos de concentración para el pH, se comparan uno a uno los grupos de concentración incluyendo también el control, para el caso de pH sólo se encuentran diferencias significativas entre el grupo 3 (0,07 g/180mL) y el grupo 1 (0,01 g/180mL),

Tabla 14 Significancia de la concentración para pH

Prueba de Tukey						
	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1 g/180mL	Control
0,01 g/180mL		0,306	0,038	0,127	0,481	0,64
0,05 g/180mL	0,306		0,927	0,997	1	0,994
0,07 g/180mL	0,038	0,927		0,996	0,654	0,8
0,1 g/180mL	0,127	0,997	0,996		0,972	0,911
1 g/180mL	0,481	1	0,8	0,972		1
Control	0,64	0,994	0,654	0,911	1	

Ilustración 20 Gráfica de conductividad para muestras sin cubrir



En cuanto a conductividad vemos como la significancia es cero para ambas relaciones en 10 días de exposición (Tabla No. 15), indicando así diferencias en los datos obtenidos, a mayor tiempo de exposición es más bajo el valor de la conductividad.

Tabla 15 Significancia del tiempo de exposición para la conductividad

Prueba de Tukey			
	6 días	8 días	10 días

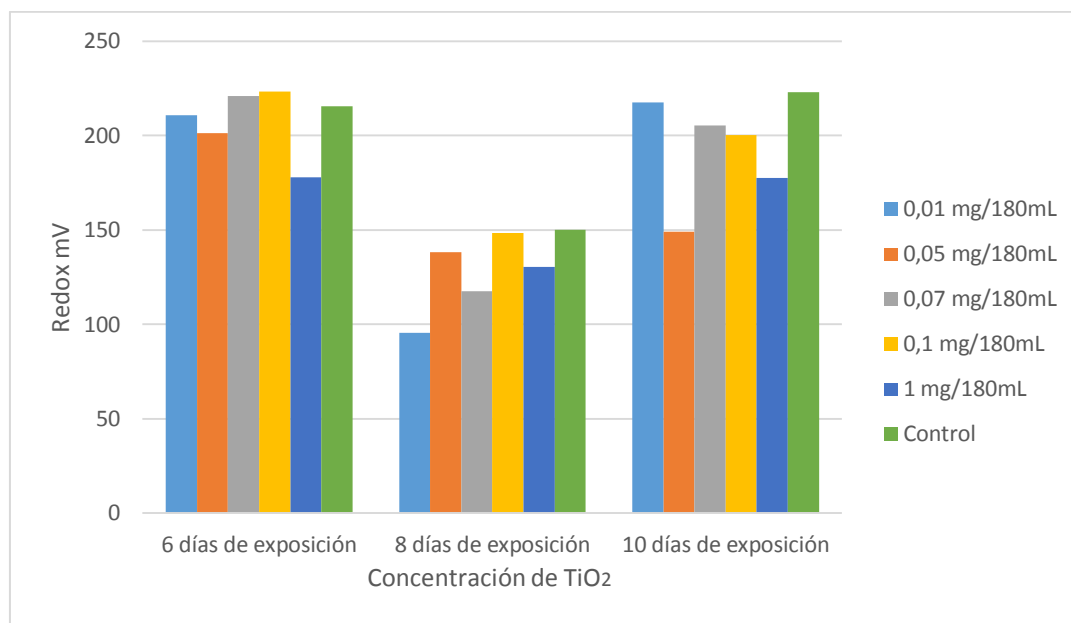
6 días		0,66	0
8 días	0,66		0
10 días	0	0	

Para el caso de la conductividad (Tabla No. 16) hay significancia en las diferencias dependiendo de la concentración utilizada, para el caso de 1g/180mL se encuentran valores menores a 0,05, para los datos de conductividad se encuentran diferencias entre el grupo 3, grupo 4 y el control con datos muy cercanos a cero, esto se ve reflejado en las gráficas para esta variable.

Tabla 16 Significancia de la concentración para la conductividad

Prueba de Tukey						
	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1 g/180mL	Control
0,01 g/180mL		0,45	1	0,94	0,001	0,458
0,05 g/180mL	0,45		0,331	0,94	0,11	0,007
0,07 g/180mL	1	0,331		0,868	0	0,590
0,1 g/180mL	0,940	0,940	0,868		0,01	0,083
1 g/180mL	0,001	0,11	0	0,01		0
Control	0,458	0,007	0,59	0,083	0	

Ilustración 21 Gráfica de óxido reducción para muestras sin cubrir



En la Ilustración 22 se observan los resultados para el potencial de óxido reducción como ya se había dicho aunque este dato no está explícito en la norma la OMS establece como promedio fiable y favorable 650 mV, como se ve en la gráfica para 6 días de exposición la concentración es irrelevante pues tan sólo con exponer la muestra control a radiación solar se aumentó 20 puntos de Oxido reducción en comparación con los datos de referencia, para los dos casos en cuanto a días de exposición restantes se observa que de la misma forma la concentración no incide pues el comportamiento es casi igual al de la muestra control, sin embargo al comparar se puede decir que las muestras cubiertas regular de manera más rápida el potencial de óxido reducción en el agua, debido a la energía absorbida.

Para la tabla del potencial de óxido reducción observamos que hay significancia menor a 0,05 en todas las relaciones (Tabla No. 17), esto muestra que los datos no permiten detectar diferencias entre los tratamientos.

Tabla 17 Significancia del tiempo de exposición para Potencial de óxido reducción

Prueba de Tukey			
	6 días	8 días	10 días
6 días		0	0,004
8 días	0		0
10 días	0,04	0	

Para los datos de potencial de óxido reducción Ver Tabla No. 18, se encuentra mayor significancia entre los tratamientos del grupo 1 y el control respecto a los demás, debido a que como se mencionó en la gráfica a mayor concentración de

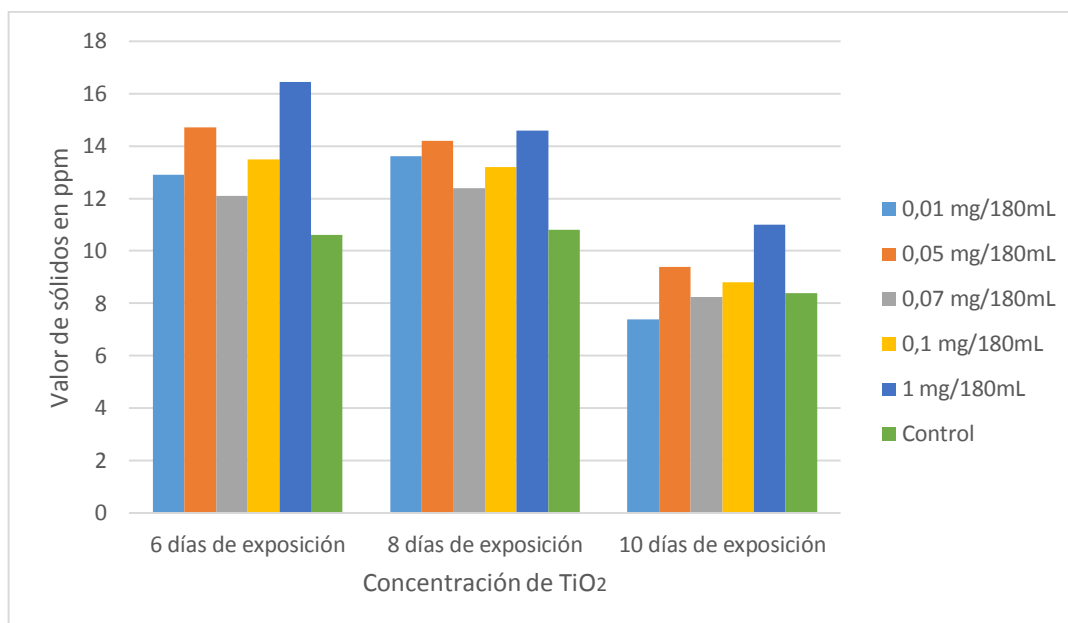
dióxido menor es la conductividad eléctrica del agua debido a la capacidad del TiO_2 de aislamiento eléctrico.

Tabla 18 Significancia de la concentración para potencial óxido reducción

Prueba de Tukey						
	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1 g/180mL	Control
0,01 g/180mL		0,258	0,85	0,053	0,191	0,003
0,05 g/180mL	0,258		0,017	0	1	0
0,07 g/180mL	0,85	0,017		0,498	0,011	0,075
0,1 g/180mL	0,053	0	0,498		0	0,907
1 g/180mL	0	1	0,011	0		0
Control	0,003	0	0,075	0,907	0	

En la Ilustración 22 se observan los datos obtenidos para sólidos en muestras sin cubrir, se puede ver que a mayor tiempo de exposición menor serán los sólidos en el agua debido a la sedimentación de las partículas, además según la gráfica la concentración más óptima será 0,07 g/10mL sin recubrir la botella al igual que con la muestra control, ya que comparando los datos de las muestras cubiertas estos muestran resultados incluso por encima de 16 ppm indicando así que no conviene cubrir la botella. Teniendo en cuenta los ensayos de calibración y conocimiento de los equipos se observó que las cantidades de TiO_2 empleadas en las muestras afectaban las mediciones de sólidos disueltos, ya que sobrepasaban el valor establecido en la norma; razón por la cual aumentamos el volumen de agua para las siguientes muestras. Afirmando así la dependencia del volumen de agua para el tratamiento y poder obtener un dato de turbidez más cercano a la norma.

Ilustración 22 Gráfica de sólidos totales para muestras sin cubrir



Para el caso de sólidos totales (Ver Tabla No. 19), encontramos la misma relación de conductividad esto debido a la directa relación entre estas dos variables, al exponer las muestras 10 días la sedimentación de las partículas es mayor y la entrada de los rayos UV se facilita al no tener partículas que lo impidan.

Tabla 19 Significancia del tiempo de exposición para sólidos totales

Prueba de Tukey			
	6 días	8 días	10 días
6 días		0,899	0
8 días	0,899		0
10 días	0	0	

Para la tabla No. 20 de sólidos totales encontramos datos menores a 0,05 en la relación del grupo 5 con los demás incluyendo el control, estos datos son comparables con los arrojados para conductividad debido a la relación directa entre estas dos variables.

Tabla 20 Significancia de la concentración para sólidos totales

Prueba de Tukey						
	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1 g/180mL	Control
0,01 g/180mL		0,416	0,99	0,983	0,011	0,498
0,05 g/180mL	0,418		0,144	0,833	0,594	0,007
0,07 g/180mL	0,99	0,144		0,789	0,002	0,853
0,1 g/180mL	0,983	0,833	0,789		0,07	0,158
1 g/180mL	0,011	0,594	0,002	0,07		0
Control	0,498	0,007	0,853	0,158	0	

9.2 Fase 2: Análisis de ensayo de *E. coli*.

Para esta fase se obtuvieron los siguientes resultados en las 30 muestras expuestas ver Tabla No. 21.

Tabla 211 Resultados de ensayo para E.coli

	Concentración					
Tiempo de exposición	0,01 g/180mL	0,05 g/180mL	0,07 g/180mL	0,1 g/180mL	1,0 g/180mL	Control
2 horas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
4 horas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
6 horas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
8 horas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
10 horas	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

Después de exponer las botellas a la lámpara UV, se determinó presencia de *E.coli* en todas las muestras; la intensidad de luz no fue suficiente para la eliminación ya que las *E.coli* fecales son sensibles a luz ultravioleta pues la intensidad necesaria para eliminarlas es de 11 mWs/cm² [6], además se estableció que el óxido al estar disuelto en la muestra no permitía el paso de los rayos UV pues se ha determinado que la concentración óptima debe estar entre 0,1 y 0,5 g/L si el óxido no se encuentra inmovilizado, evitando que se eliminaran los *E.coli*. El tiempo de exposición no fue suficiente, además de esto se puede decir que el volumen no fue

suficiente pues las concentraciones eran altas y evitaban el paso de los rayos UV. El método presencia ausencia es sensible y aunque haya una sola célula muestra la presencia de *E. coli*.

9.3 Fase 3 y 4: Análisis de resultados en la inmovilización de TiO_2 en las muestras

En el ensayo de inmovilización se implementó un método distinto para la evaluación del efecto sobre la calidad microbiana, el método de presencia- ausencia no permitió detectar el efecto de los tratamientos mientras que la siembra en medios de cultivo en caja, arrojó resultados en UFC/caja y permitió establecer el efecto de los tratamientos, ver tabla No. 22.

Al hacer la inmovilización del dióxido en los tubos, se obtuvieron los siguientes resultados en el conteo de colonias después de cada periodo de exposición:

Tabla 222 Conteo de colonias UFC/caja

	Control	Aceite de clavo	Aceite de oliva	Deposición seca
Sin exposición	300	287,5	273,5	243,5
1 hora	120	240	223	180,5
2 horas	115	205,5	156,5	147
3 horas	89	93,5	105	143,5
4 horas	67	61	45	138,5

En los datos de la muestra control hay más de 300 colonias lo que indica una gran población bacteriana, dicho control es una referencia para así determinar qué tan eficaz es el tratamiento con dióxido y aceite de clavo; al hacer la comparación se puede decir que tanto el control como el tratamiento son eficaces para la eliminación de coliformes y población bacteriana, sin embargo es más efectivo el tratamiento con TiO_2 , pues se ve la disminución al pasar las 4 horas de exposición. Al inmovilizar el dióxido, el paso de los rayos UV es mayor, debido a esto disminuyó el número de células en la muestra y en consecuencia no crecieron colonias. Aunque el aceite de clavo tiene un efecto antimicrobiano, se descarta como inmovilizador para el proyecto por su costo. Para el ensayo de inmovilización con aceite de oliva se hizo la misma exposición a 4 horas en la lámpara, teniendo en cuenta el control, es notable la eliminación de coliformes. Para ambas muestras hubo reducción al realizar el conteo de las colonias presentes. Se escogió para las pruebas finales la inmovilización con aceite de oliva por su eficacia en la eliminación de coliformes y por su bajo costo para el proyecto. Para la inmovilización con deposición seca se ve claramente que no es factible ni eficaz este tratamiento, el dióxido queda

adherido a las paredes del tubo impidiendo el paso de los rayos UV, lo que no favorece la eliminación de las células microbianas, incluso se ve como las colonias aumentan a medida que pasan las horas de exposición, por esta razón se descarta la deposición seca como método de inmovilización.

Para la tabla No 23 vemos los datos de significancia por cada periodo de exposición inmovilizando el dióxido con aceite, vemos la diferencia entre exponer las botellas de 1 a 4 horas o por el contrario no exponerlas, los datos menores a 0,05 nos muestra la diferencia clara entre exponer las botellas a mayor tiempo de exposición es mayor la eliminación de coliformes por efecto del dióxido inmovilizado y la radiación UV. Se hace sólo para el aceite de oliva ya que es el método de inmovilización que se escoge.

Tabla 23 Prueba de tukey para conteo colonias por periodo de exposición para aceite de Oliva

	Sin exposición	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
Sin exposición		0,051	0,001	0	0
1 hora	0,051		0,522	0,008	0
2 horas	0,001	0,522		0,257	0,018
3 horas	0	0,008	0,257		0,722
4 horas	0	0	0,018	0,722	

9.4 Fase 5: Análisis de la exposición de muestras en botellas Pet

9.4.1 Muestras de agua de pecera expuestas a la lámpara UV

En la Tabla No. 24 **Error! Reference source not found.** se observó que tan eficaz es el tratamiento según la concentración, para este caso se tuvo en cuenta un dato de referencia donde el crecimiento de colonias para coliformes era de más de 200 sin exposición; en los 4 tratamientos se redujo la cantidad de colonias y a mayor tiempo de exposición menor era el número de coliformes. Para la concentración 50 g TiO₂/1,5 L, la disminución es mayor a las 21 horas de exposición se eliminó casi en un 90% la presencia de coliformes en la muestra, dicha concentración es óptima y permite el paso de la luz para así dar cabida al efecto foto catalítico. En este caso la concentración es mayor a la determinada en investigaciones anteriores, sin embargo al estar el dióxido inmovilizado en el aceite controla la dispersión del mismo en el agua, disminuyendo el apantallamiento y mejorando el paso de los rayos UV.

Tabla 24 Conteo de UFC/caja por tiempo de exposición

	Control	10g	50g	100g
Sin exposición	225	225	225	225
12 Horas	198	187	195	115
16 Horas	156	113	114	98
20 Horas	134	98	56	76
24 Horas	122	51	11	55

9.4.2 Muestras de agua de pecera y quebrada expuestas a radiación solar

Después de exponer las botellas durante 2 días a la radiación solar y tomar dos muestras se obtuvieron los siguientes resultados (Ilustración 23)(Ilustración 24). Para las muestras de la quebrada y pecera se ve una reducción del crecimiento de colonias en los tres tratamientos, además el control muestra que tan sólo con la exposición solar es posible evitar la reproducción de coliformes. Sin embargo se reitera que la concentración óptima para el proceso de fotocátalisis es 50g/1,5L, esto se debe a que la luz promueve reacciones de oxidación iniciadas por la presencia de radicales libres, en este caso el agente oxidante sería el dióxido de titanio.

Ilustración 23 Conteo de UFC/caja por tratamiento para agua de pecera

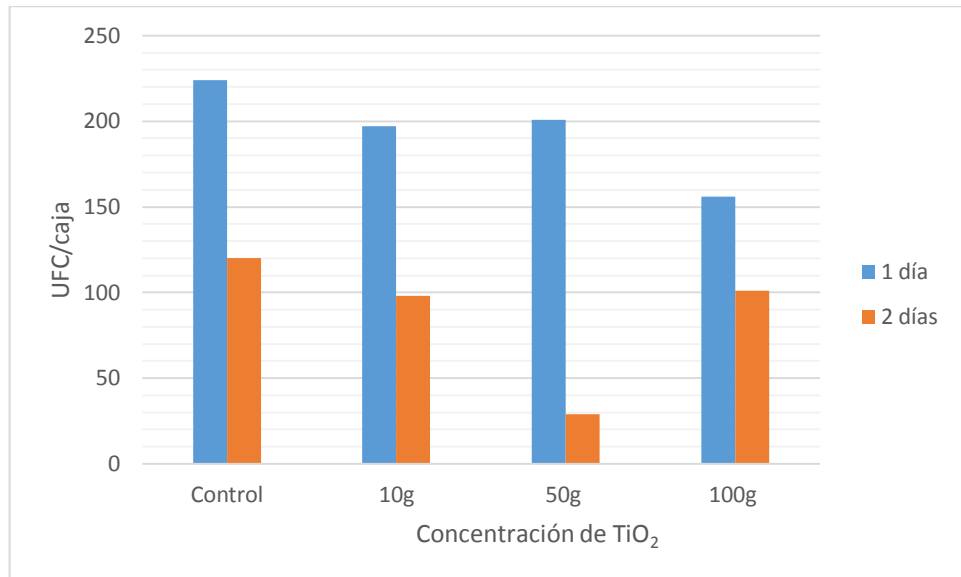
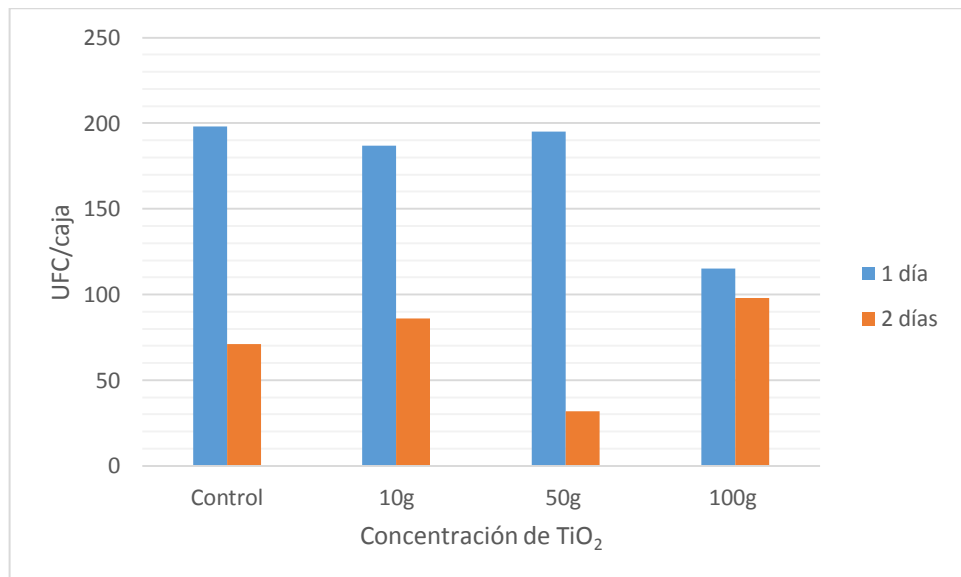


Ilustración 24 Conteo de UFC/caja por tratamiento para agua de quebrada



9. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de TiO_2 activado o no activado con radiación UV no afecta los valores de calidad de agua para pH que establece la resolución 2115 de 2007.
- Este proyecto se debe complementar con otras alternativas de desinfección ya que no es suficiente para tener un óptimo resultado.
- Al aumentar la concentración de dióxido de titanio se activa la posibilidad de degradación de materia orgánica y desinfección, ayudando a la eliminación de coliformes presentes en el agua, ya que se generan más radicales hidroxilos sin embargo los días de exposición no son suficientes para la eliminación total de coliformes.
- El método de configuración más simple y óptima para la desinfección de agua potable será el método de fotocátalisis con dióxido de titanio inmovilizado con aceite de oliva, debido a que permite el paso de los rayos UV, haciendo el proceso más rápido y económico.
- El proyecto actual aportó un procedimiento para inmovilizar el TiO_2 permitiendo usar concentraciones mayores a las reportadas en la literatura consultada, determinó el efecto del vidrio y del plástico y del volumen del reactor sobre la eficiencia del tratamiento. Se deben tener en cuenta los sólidos disueltos que se dan por el óxido ya que concentraciones elevadas evitan la penetración de los rayos UV en el tratamiento.
- Para determinar el efecto de los experimentos de potabilización sobre la contaminación microbiana en muestras de agua con el objetivo de validar una técnica, es más conveniente utilizar un método sensible como el de recuento y no el formato presencia ausencia.
- Al evaluar los resultados del proyecto se concluye que es una alternativa económica para la desinfección del agua cruda, sin embargo no es viable implementarlo en el contexto que se muestra pues deben hacerse mejoras y replantear el material utilizado para exponer el agua.

10 RECOMENDACIONES

- Al demostrar que la inmovilización se reduce con el efecto pantalla se debe mejorar el método para este efecto y dar más paso a los rayos UV. Por esto se debe asegurar una óptima inmovilización sin afectar las características del agua.
- Para asegurar una desinfección adecuada, es importante que las botellas de se coloquen en una posición inclinada y en un lugar que asegure una radiación constante, teniendo en cuenta la posición del sol en la época del año que se expongan las botellas.
- Durante los días con lluvias continuas, el tratamiento no funciona satisfactoriamente se debe contar como un día de no exposición. Es necesario combinar esta alternativa con otras medidas de desinfección para hacerla viable.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unicef, «El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo.,» Unicef, Bogotá, 2013.
- [2] T. McKeown, Introducción a la medicina social, México: Siglo veintiuno editores, 1989.
- [3] J. C. Ledezma, «Desinfección de aguas mediante uso de aguas emergentes basadas en procesos avanzados de oxidación,» *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, vol. 1, nº 4, pp. 74-83, 2010.
- [4] Metcalf & Eddy Incorporated, de *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización, Volumen 1*, McGraw-Hill, 1996, pp. 369-402.
- [5] S. Malato, J. Blanco, C. Richter y M. I. Maldonado, «Optimization of pre-industrial solar photocatalytic mineralization of commercial pesticides - Application to pesticide container recycling,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 25, nº 1, pp. 31-38, 2000.
- [6] N. Beltrán y B. Jiménez, «Eficiencia de la luz ultravioleta para la desinfección de agua residual con alto contenido de patógeno,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2001.
- [7] IDEAM, «IDEAM,» 2015. [En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>. [Último acceso: 2016].
- [8] Himat, «Geometría Solar y Trayectorias del Sol en Colombia.,» Bogotá, 1996.
- [9] J. A. Valencia, de *Teoría y práctica de la purificación del agua 3 Edición*, Bogotá, McGraw Hill, 2000, pp. 633-697.
- [10] J. C. D. A. Maskew G. F., de *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales: Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales*, México D.F, Grupo Noriega editores , 1987, pp. 403-467.
- [11] S. FM, «Formulation of mathematical model to predict solar water disinfection,» *Water Research*, vol. 37, pp. 3921-3927, 2003.
- [12] R. Meierhofer y M. Wegelin, «Guía de aplicación para desinfección solar del agua,» COSUDE, UNICEF Y PAS, 2002.
- [13] S. Kehoe , T. Joyce , P. Ibrahim , J. Gillespie , R. Shahr y K. McGuigan, «Effect of agitation, turbidity, aluminium foil reflectors and container volume on the

inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors,» *Water Res*, vol. 4, pp. 1061-1065, 2001.

- [14] M. Cho, H. Chung, W. Choi y J. Yoon, «Different Inactivation Behaviors of MS-2 Phage and Escherichia coli in TiO₂ Photocatalytic Disinfection,» *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 71, pp. 270-275, 2005.
- [15] E. Velasco, A. Moreno y S. Giraldo, «Efecto de la presencia de sales inorgánicas sobre la inactivación fotocatalítica de E.Coli en agua.,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9, nº 17, pp. 193-208, 2013.
- [16] C. Castro, S. Giraldo, A. Arambula y A. Centeno , «Degradación Heliofotocatalítica de Escherichia coli en Escherichia coli en Sistemas tipo Desinfección SODIS, con Dióxido de Titanio Modificado,» *Información tecnológica*, vol. 20, nº 6, pp. 29-36, 2009.
- [17] A. Vidal, M. Luengo y M.A, «Inactivation of titanium dioxide by sulphur:photocatalytic,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 32, pp. 1-9, 2001.
- [18] J.-M. Herrmann, C. Guillard, J. Disdier, C. Lehaut, S. Malato y J. Blanco, «New industrial titania photocatalysts for the solar detoxication of water containing various pollutants,» *Applied catalysis B: Environmental*, vol. 35, pp. 281-294, 2002.
- [19] S. Parra, S. Malato y C. Pulgarín, «New integrated photocatalytic-biological flow system using supported TiO₂ and fixed bacteria for the mineralization of isoproturon,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 36, nº 2, pp. 131-144, 2002.
- [20] P. Gao, C. Wing Hang, M. Herrmann, C. K. Chan y P. L. Yue, «Photooxidation of a model pollutant in an oscillatory flow reactor with baffles,» *Chemical Engineering Science*, vol. 58, pp. 1013-1020, 2003.
- [21] «Solar efficiency of a new deposited titania photocatalyst: chlorophenol, pesticide and dye,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 46, pp. 319-332, 2003.
- [22] V. Augugliaro, A. Bianco Prevot, J. Cáceres Vásquez, E. García López, A. Irico, V. Loddo, S. Malato Rodríguez, G. Marci y L. Palmisano, «Photocatalytic oxidation of acetonitrile in aqueous suspension of titanium dioxide irradiated by sunlight,» *Advances in Environmental Research*, vol. 8, pp. 329-335, 2004.
- [23] V. M. Sarria, S. Parra, Á. G. Rincón, C. Pulgarín y R. A. Torres, «Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida,» *Revista Colombiana de Química*, vol. 34, nº 2, 2002.

- [24] H. Grossa, «Disponibilidad y características de la radiación solar en Sudamérica,» de *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, Solar Safe Water, 2005, pp. 85-92.
- [25] G. M. Restrepo, L. A. Rios, J. M. Marín, J. F. Montoya y J. A. Velásquez , «Evaluación del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar,» Universidad de Antioquia, Medellín, 2008.
- [26] S. Valencia, J. Marín y G. Restrepo, «Efecto del pH en la Degradación Fotocatalítica de Materia Orgánica Natural.,» *Información tecnológica*, vol. 22, nº 5, pp. 57-66, 2011.
- [27] G. Eva, «Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud,» Farmacia, 2004.
- [28] R. Gonzales, «Eugenol: propiedades farmacológicas y toxicológicas. Ventajas y desventajas de su uso,» *Revista Cubana Estomatol*, vol. 39, nº 2, 2002.
- [29] E. d. A. y. A. d. Bogotá, «Estudios para la adecuación de la quebrada Las Delicias,» [En línea]. Disponible en: <http://eacennt09.acueducto.com.co:8085/?sGet&DlxfTH1WXw15A3d4P350awIXQFN5KQx2XAMBCR8DHnEAdHIEXHABCRsCHngHegAPXxVSV0JDZIQNKVB DDBVBbkbBXFflwwHXQcEHklaQ1VeLFxSUAMADxkDFhUCCEFTC20zMTgvMy8wME0xNww%3D>. [Último acceso: Agosto 2013].
- [30] G. Transmerquim, «Hoja de seguridad Dióxido de titanio Anatase,» GTM, Bogotá, 2014.
- [31] Google Maps, «Google Maps,» [En línea]. Disponible en: <https://www.google.it/maps/@4.6505,-74.0506881,17.99z>. [Último acceso: 2015].
- [32] Ohaus. [En línea]. Disponible en: http://www.ohaus.com.mx/explorer_pro_a.htm. [Último acceso: Narzo 2016].
- [33] MDM Científica, «Caldo Lauryl Sulfato con MUG,» MDM, España, 2016.
- [34] M. Terrádez y J. Ángel, «Análisis de la varianza (ANOVA),» [En línea]. Disponible en: <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/ANOVA.pdf>. [Último acceso: 07 08 2014].
- [35] L. Garces, E. Mejía y J. Santamaría, «La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales,» Universidad de la salle, Bogotá, 2010.
- [36] «Sunear Tools,» 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es.

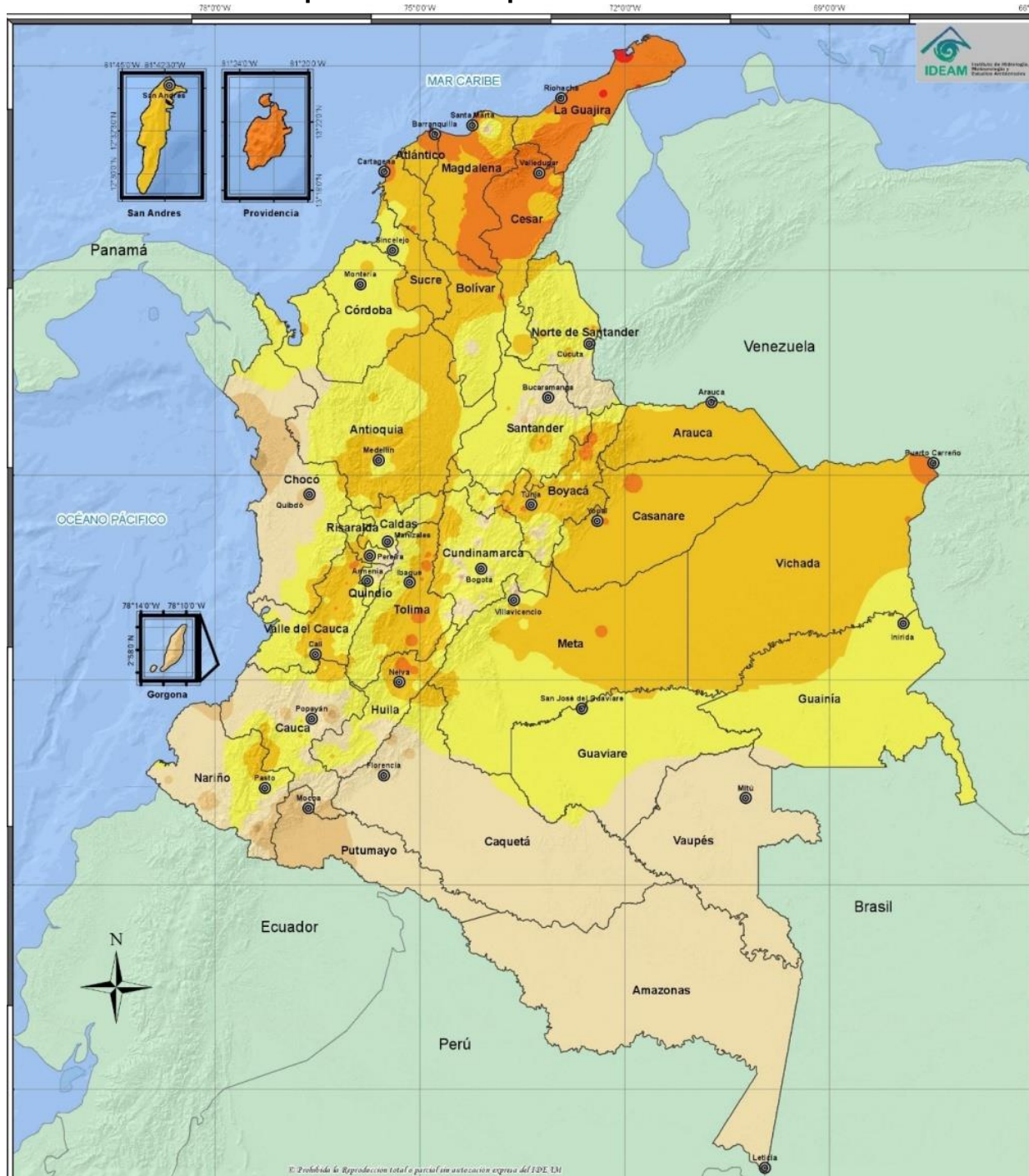
- [37] A. Moreno, C. Castro y A. Centeno, «Cinética de la Desinfección Fotocatalítica de Agua contaminada con E. coli. Efecto de la Concentración del Fotocatalizador y la Potencia de Irradiación (Pruebas de desinfección fotocatalítica),» *Información tecnológica*, vol. 22, nº 3, pp. 69-78, 2011.
- [38] C. Castro, S. Giraldo , O. Salazar, A. Centeno y C. Romero, «Efecto de la composición química del agua sobre su desinfección fotocatalítica,» *U.D.C.A*, vol. 14, nº 1, pp. 117-125, 2011.
- [39] MAVDT, «Resolución 2115,» Bogotá D.C., 2007.
- [40] L. D. Leon, «Floraciones algales de agua dulce: cianobacterias, cianotoxinas. Su relación con la salud,» *Universidad de la Republica Uruguay. Sección Limnología, Instituto de Biología, Facultad De Ciencias.*, 2002.
- [41] UPM, «Método número más probable,» [En línea]. Disponible en: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p4-nmpenumeracion.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [42] H. Instruments, «Hanna Instruments,» [En línea]. Disponible en: <http://www.hannainst.es/blog/conductividad-y-solidos-disueltos/>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [43] R. Á. Cáceres, Estadística aplicada a las ciencias de la salud, Ediciones Díaz de Santos, 2007, p. 509.
- [44] G. Premazzi y L. Volterra, Microphyte Toxins. A manual for toxin detection, environmental monitoring and therapies to counteract intoxications., Roma: Joint Research Centre, 1993.
- [45] T. d. J. V. Marín, «Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso,» Universidad de las Américas Puebla, Puebla, 2004.
- [46] Environmental Protection Agency, «Advanced Photochemical Oxidation Processes Handbook,» EPA, Washington, 1998.
- [47] A. Fujishima y K. Honda, «Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode,» *Nature*, vol. 238, pp. 37-38, 1972.
- [48] N. Rojas Higuera, A. Sánchez Garibello , A. Matiz Villamil, J. C. Salcedo Reyes, A. K. Carrascal Camacho y A. M. Pedroza Rodríguez, «Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y Escherichia coli presentes en agua

residual doméstica, empleada para riego,» *Pontificia Universidad Javeriana Facultad de Ciencias*, vol. 15, nº 2, pp. 139-149, 2010.

- [49] R. Candal, S. Bilmes y M. Blesa, «Semiconductores con actividad fotocatalítica,» de *Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, Madrid, CIEMAT, 2004, pp. 97-122.

ANEXOS

Anexo No. 1 Mapa de radiación para el año 2015 en Colombia.



Anexo No. 2 Equipo Multiparámetro Hanna 9229



Anexo No. 3 Ficha técnica Dióxido de titanio, Anatase



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: **DIOXIDO DE TITANIO "ANATASE"**
Fecha de Revisión: Agosto 2014. Revisión N°3



NFPA

SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO

Nombre Químico: DIOXIDO DE TITANIO "ANATASE" - TiO_2
Número CAS: 13463-67-7
Sinónimos: Bióxido de titanio, Rutilo.

COMPAÑÍA: GTM

Teléfonos de Emergencia

México : +55 5831 7905 – SETIQ 01 800 00 214 00
Guatemala: +502 66285858
El Salvador: +503 22517700
Honduras: +504 2540 2520
Nicaragua: +505 2269 0361 – Toxicología MINSA: +505 22897395
Costa Rica: +506 25370010 – Emergencias 9-1-1. Centro Intoxicaciones +506 2223-1028
Panamá: +507 5126182 – Emergencias 9-1-1
Colombia: +018000 916012 Cisproquim / (571) 2 88 60 12 (Bogotá)
Perú: +511614 65 00
Ecuador: +593 2382 6250 – Emergencias (ECU) 9-1-1
Argentina +54 115031 1774

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

DIOXIDO DE TITANIO **CAS: 13463-67-7** **99-100% PUREZA**

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU: No regulado
Clasificación NFPA: Salud: 1 Inflamabilidad: 0 Reactividad: 0

EFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

El material no se clasifica como peligroso bajo la directiva 67/548/EEC. No se encuentran peligros generales o específicos. No se necesita ningún tratamiento.

TWA: 10 mg/m³
Inhalación: Irritación del tracto respiratorio superior, tos, dificultad para respirar, irritación de las membranas mucosas.

Ingestión: Náuseas, dolor abdominal, vómito y diarrea. Puede ocurrir lesión en el riñón.

Piel: Puede causar irritación y dermatitis.

Ojos: Puede causar irritación.

SECCION 4 : MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Trasladar a la víctima al aire fresco. Si la respiración es difícil, suministre oxígeno. Si la respiración se ha detenido, dar respiración artificial. Mantenga a la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediata.

Contacto Dérmico: Retirar inmediatamente la ropa y zapatos contaminados. Lave la piel inmediatamente con abundante agua y jabón por lo menos durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

Contacto Ocular: Lave bien los ojos con abundante agua al menos durante 15 minutos, manteniendo los párpados separados para asegurar la remoción del producto. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

Ingestión: El material no es tóxico y no se retiene en el tracto intestinal. No induzca el vomito. Lavar la boca con agua. Si la víctima está totalmente consciente, suministrar 200 ml de agua. Busque atención médica si los síntomas persisten.

SECCION 5 : MEDIDAS PARA EXTINCION DE INCENDIOS

Punto de Inflamación: N.A.
Temperatura de Auto ignición: N.A.
Limites de Inflamabilidad (%V/V): N.A.
Peligros de Incendio y/o Explosión: No hay riesgos identificados

Productos de la Combustión: No han sido identificados.

Precauciones para Evitar Incendio y/o Explosión: No requiere precauciones especiales.



Procedimientos en caso de Incendio y/o Explosión:

El material no es inflamable y no hay existen riesgos de incendio. El material de embalaje es combustible, si se prende fuego en el envase se puede extinguir con agua.

Agentes Extintores del Fuego:

Elegir el agente adecuado de acuerdo al fuego de los alrededores.

SECCION 6: MEDIDAS PARA FUGAS ACCIDENTALES

Derrames: Limpiar la superficie con abundante agua. No es necesario neutralizar. El material es inerte. No se originan peligros medioambientales. Evitar que el producto penetre en alcantarillas o cursos de agua.

SECCION 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

MANIPULACION:

Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, comer o beber en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en donde está ubicado el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente.

ALMACENAMIENTO:

Almacenar en lugares ventilados, frescos, secos y señalizados. Lejos de fuentes de calor e ignición. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados.

SECCION 8: CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

Ventilación:

Use escape local.

Protección de la piel:

El producto no es irritante pero es un colorante fuerte y la partícula fina de él puede absorber la humedad y los aceites naturales de la superficie de la piel, provocando sequedad. Debe evitarse la exposición prolongada llevando guantes protectores y ropa adecuada.

Protección de las vías respiratorias:

Usar respirador con filtro para el polvo.

Protección de los ojos:

Usar gafas protectoras

SECCION 9: PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Aspecto	Polvo
Color:	Blanco
Olor:	Ninguno
Punto de ebullición:	2900 °C
Gravedad Específica:	4.26
pH:	6 – 7
Densidad relativa:	500 – 1200 kg/m ³
Punto de fusión:	1855 °C
Tamaño de partícula primario:	0.15 – 0.40 um
Solubilidad en el agua:	Insoluble en agua, álcalis, ácidos diluidos y disolventes orgánicos.

SECCION 10 : ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad:	Estable bajo condiciones normales (hasta 1700 °C) e inerte para la mayoría de reactivos químicos, pero el tratamiento de la superficie de los componentes orgánicos liberará cuando se sobrepasen los 200 °C.
Productos peligrosos por descomposición:	La descomposición térmica puede generar titanio y oxígeno.
Incompatibilidades:	Violentas reacciones pueden ocurrir con el litio alrededor de los 200°C. Evítese polvos de Ca, Li, Mg, Na, K y Zn.
Condiciones a evitar:	Polvos de incompatibles, calor, humedad, luces incandescentes y destellantes.
Riesgo de Polimerización:	Si

SECCION 11 : INFORMACION TOXICOLOGICA

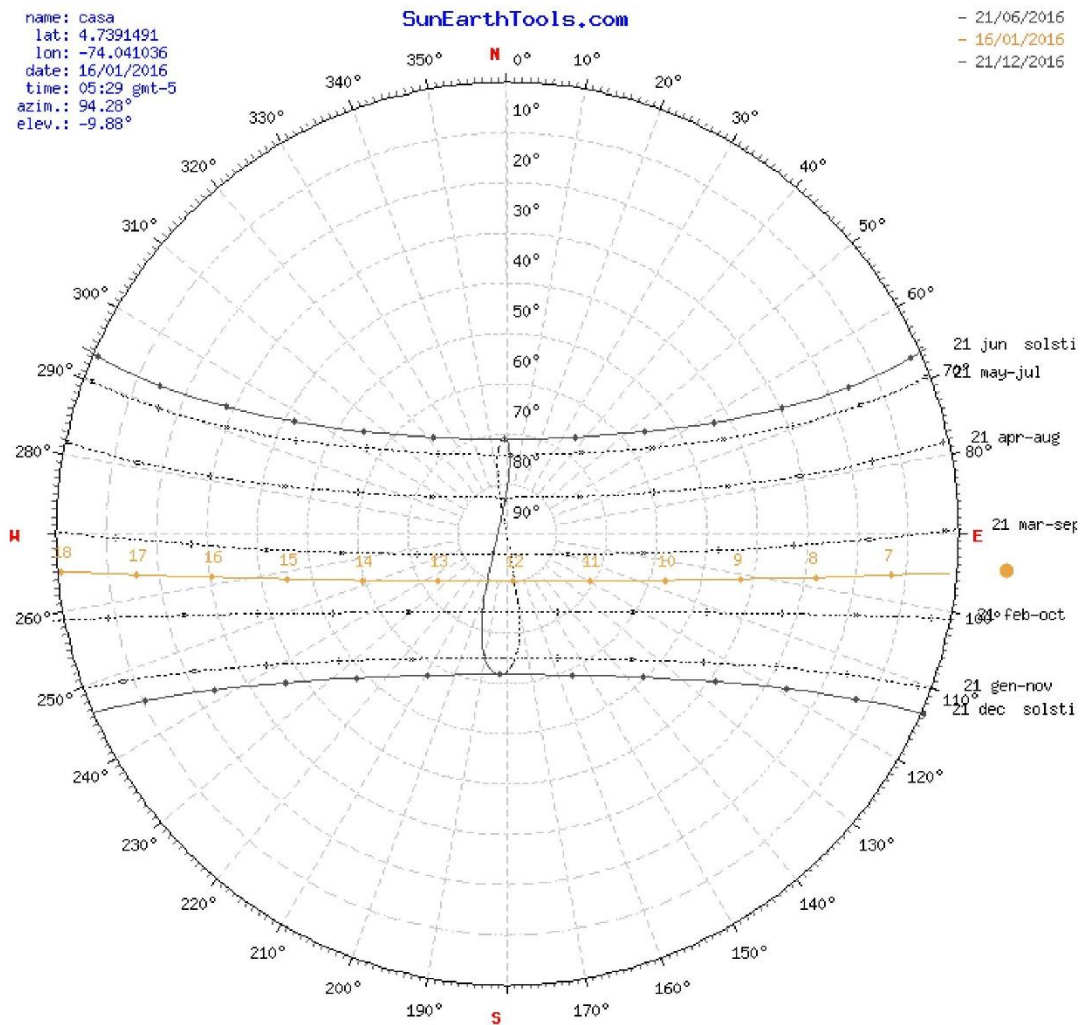
NOTA: El material no es tóxico. No se ha detectado ningún efecto agudo o crónico.

SECCION 12 : INFORMACION ECOLOGICA

Esta limitada la movilidad de partículas sólidas del material. El material no es biológicamente activo y no es biodegradable.

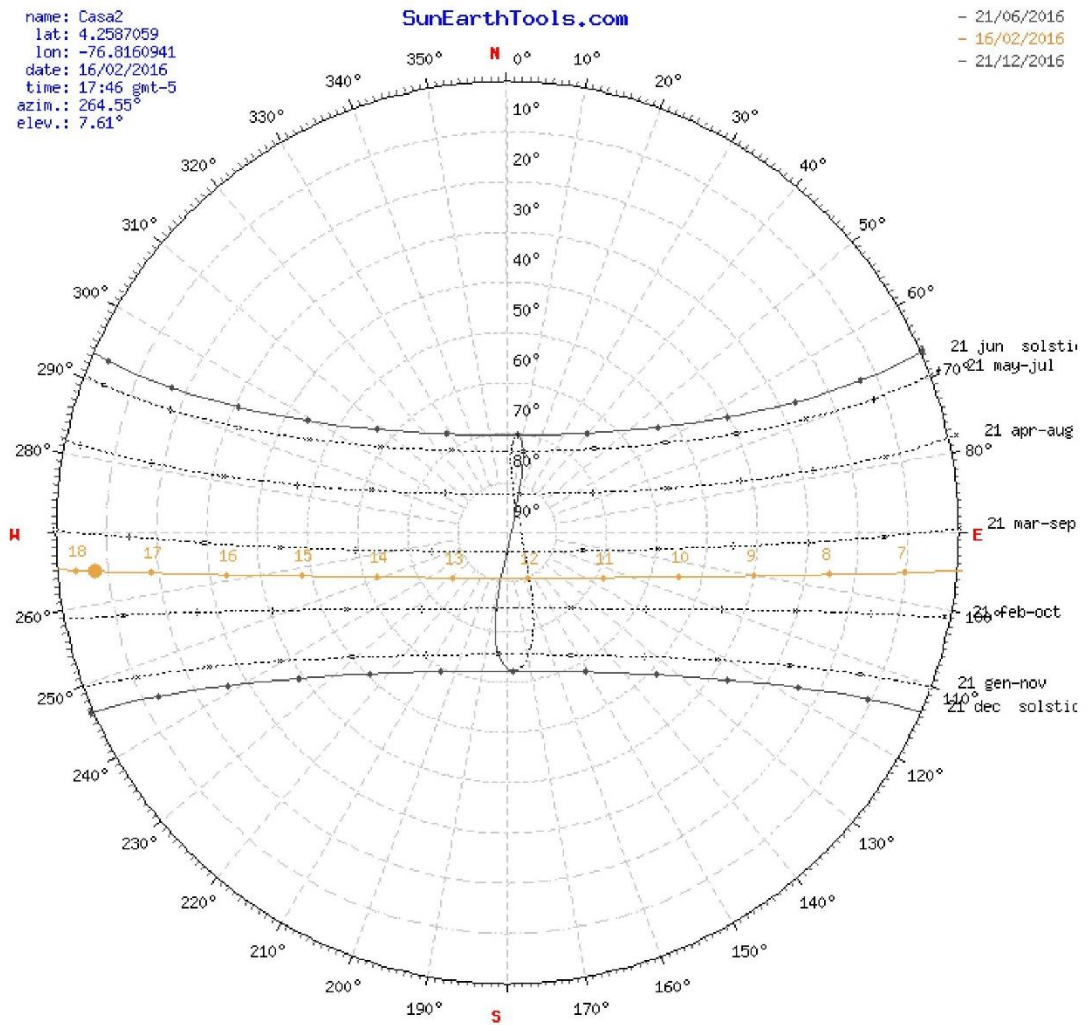
Este producto es insoluble en agua, y sólo en enormes cantidades puede formar un sedimento que afecte el plancton. Su depósito sobre una superficie natural formará parte de la composición del suelo enriqueciendo el componente mineral.

**Anexo No. 4 Posición del sol para el primer montaje, fecha: 16 de enero 2016
Fase1**



Fuente: [36].

Anexo No. 5 Posición del sol para segundo montaje, Fecha 16 de febrero de 2016 Fase 2



Fuente: [36]