

**INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE FIBRAS TEXTILES MODIFICADAS CON
TiO₂ EN LA DESINFECCIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON *E. coli* EN UN
REACTOR CAPTADOR PARABÓLICO COMPUESTO**

**MÓNICA PATRICIA CABALLERO ESPARZA
DEISY MILENA MARTÍNEZ RUGELES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE FIBRAS TEXTILES MODIFICADAS CON
TiO₂ EN LA DESINFECCIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON *E. coli* EN UN
REACTOR CAPTADOR PARABÓLICO COMPUESTO**

**MÓNICA PATRICIA CABALLERO ESPARZA
DEISY MILENA MARTÍNEZ RUGELES**

Trabajo de grado en Modalidad Investigación para optar al título de
INGENIERO(A) QUÍMICO(A)

Director

HERNANDO GUERRERO AMAYA

Ingeniero Químico, PhD

Codirectora

LUZ MARINA BALLESTEROS RUEDA

Ingeniera Química, M. Sc., PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Ser estudiante es un proceso de aprendizaje y crecimiento constante, durante este proceso debemos garantizar el enriquecimiento conceptual y moral. Para el enriquecimiento conceptual se cuenta con material físico (Libros)*, por ende, si se quiere se logra fácilmente, pero para enriquecernos moralmente necesitamos interactuar con nuestros semejantes aprendiendo de su ética y fomentando la nuestra, lograr esto tiene cierta dificultad, pero existen personas que catalizan este proceso. Por esto agradezco inmensamente y dedico este logro a mi mami, Alcira Esparza Parra ejemplo de fortaleza, valentía y tenacidad; a mi papi Justo Germán Caballero Ortiz ejemplo de tolerancia, gratitud y humildad; a mi hermano Germán Augusto Caballero Esparza ejemplo de esperanza y chispa de alegría en la adversidad. Sin ustedes esto jamás se hubiese logrado, son un armonioso grupo que fomentaron mi crecimiento y me acompañaron durante el desarrollo de este proyecto de investigación. Por último y más importante toda acción debe tener un fin el cual debe estar enfocado en el bien ¿Cuál bien?, abrumadora cuestión, sin embargo, si se tiene a Dios en nuestra vida las acciones serán con amor infinito llegando a ese bien, así Dios es el colchoncito deseado en momentos difíciles y la fuerza motriz en el camino al logro. Por esto cada logro será por él y para él. Gracias Dios toda la gloria sea para ti.

Mónica Caballero

* No puedo pasar por alto a las personas que nos facilitan el crecimiento integral como persona, los profesores generan para mí la mejor acción de bondad existente de un ser humano transmitiendo lo mejor de sí a los demás.

DEDICATORIA

Hoy y cada día de mi vida agradezco infinitamente a Dios por darme la oportunidad de alcanzar una de mis metas, y tengo la convicción que cada paso que dé me llevará a ser feliz y orgullosa de quién soy.

Sé que soy una persona afortunada, por que crecí con personas valiosas, que me infunden coraje, que velan día y noche para que pueda forjar mis sueños, que sonrían al verme triunfar, que me motivan y guían cuando pierdo mi norte, ellos resguardan mi vida y puedo decirles que para son mis ángeles, agradezco a Dios y a la virgen por tenerlos conmigo, mis más eternos agradecimientos por darme su amor sin esperar nada a cambio, y tengan presente que cada uno de mis triunfos va dirigido a ustedes.

En el transcurso de mi vida, de alguna u otra forma mucha gente ayudó a que llegará hasta acá, agradezco a mis profesores del Colegio, de la Universidad, a mis compañeros, a mis amigos, a mi familia y a todas aquellas personas que han llegado y se quedado para darme felicidad.

Agradezco a mis padres, Laureano Martínez, Lola Rugeles y Laureano Sarmiento (Rukito), por su educación, su ayuda, por dejarme decidir mi camino, por su amor y fe en mí, y debo resaltar a mi viejito, mi Rukito, que sin esperar nada a cambio me ayudó a ser quién soy en estos momentos, gracias por sus voces de aliento, por cada una de sus llamadas, de su apoyo, de sus consejos, gracias por hacerme saber lo orgulloso que se siente de mí, gracias por dejarme ser su hija, para mí siempre será un honor y yo sé que para mis hermanos también lo es, gracias por llegar a nuestras vidas.

Agradezco a mis hermanos, a Adiela, Yolanda, Carlos, Fabio y a Nydia, por estar conmigo así estén lejos, por su preocupación, por sus consejos, por su ayuda, por su amor, deseo para ustedes una vida llena de felicidad y Dios siempre los proteja y guie cada una de sus decisiones, deseo que siempre estemos unidos.

Deisy Milena Martínez Rugeles

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y a los profesores que hacen parte, y día a día se esmeran en forjar profesionales íntegros en cada una de las áreas del saber, moldeándonos y enseñándonos a defendernos en lo que haremos a lo largo de nuestra vida.

Al centro de investigaciones en Catálisis (CICAT), por disponernos sus instalaciones, equipos, materiales y el acompañamiento a lo largo del proyecto.

A la profesora Luz Marina Ballesteros Rueda y al profesor Hernando Guerrero, por su disponibilidad, su paciencia, compromiso y confianza puesta en nosotras para el desarrollo del proyecto.

A el centro de investigaciones en enfermedades tropicales (CINTROP), al grupo de investigaciones en Minerales, Biohidrometalúrgia y Ambiente (GIMBA), al laboratorio de microscopía, y a cada uno de aquellas personas que hacen parte del parque tecnológico Guatiguará y que nos colaboraron de uno u otra forma para realización de la investigación, especialmente a Diana Osorio, a Manuel Fonseca por su ayuda, sus recomendaciones y disponernos de materiales y equipos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. METODOLOGÍA	27
1.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	28
1.1.1 Niveles de Variación	30
1.2 SECCIÓN EXPERIMENTAL	31
1.2.1 Materiales	31
1.2.2 Modificación de textiles mediante la adhesión superficial de partículas de TiO ₂	31
1.2.3 Evaluación de la Actividad Fotocatalítica de los Textiles Modificados	33
1.2.4 Estabilidad de las Muestras	36
2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
2.1 CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE TIO ₂ EN SUSPENSIÓN.....	37
2.2 DESEMPEÑO BACTERICIDA.....	38
2.2.1 Inmovilización de los Textiles.....	38
2.2.2 Reacción y Estabilidad del Material	38
2.2.3 Lixiviación del Catalizador.....	44
2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA	48
2.4 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	49
3. CONCLUSIONES	53
4. RECOMENDACIONES.....	54
5. REFERENCIAS	55

BIBLIOGRAFÍA..... 61

ANEXOS..... 67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de reacción fotocatalítica del TiO_2 [1]	20
Figura 2. Celobiosa. Dímero repetitivo de la celulosa formado por dos moléculas de glucosa unidas por un enlace β D-1,4 glucosídico.....	26
Figura 3. Etapas metodológicas.....	27
Figura 4. Esquema de los factores directamente relacionados con el problema a tratar	28
Figura 5. Representación geométrica del diseño de experimento	29
Figura 6. TiO_2 adherido en textiles inmovilizados con diferentes concentraciones en suspensión por el método de inmersión discontinua sin fotoactivación del textil	38
Figura 7. TiO_2 adherido en textiles inmovilizados con diferentes concentraciones en suspensión por el método no fotactivado y fotoactivo (FA).....	39
Figura 8. a) Actividad fotobactericida de textiles de algodón funcionalizados durante el primer reuso. b) Comportamiento luz UV solar	41
Figura 9. Promedio de número de reúsos logrado por cada textil.....	42
Figura 10. a) Actividad fotocatalítica durante siete reúsos de los textiles modificados con una concentración de $0,4 \text{ gTiO}_2/\text{l}$ +luz UV, en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a $70\text{W}/\text{m}^2$. b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo dado durante la reacción	43
Figura 11. Comportamiento de lixiviaciones de TiO_2 para textiles inmovilizados con suspensión de a) $0,8 \text{ gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$, b) $0,4 \text{ gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$, c) $0,8 \text{ gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$ con fotoactivación y d) $0,4 \text{ gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$ con fotoactivación.....	46

Figura 12. Respuestas promedio para cada combinación de los tratamientos realizados	49
Figura 13. Análisis SEM para muestras de algodón inmovilizados con 0,4 gTiO ₂ /L H ₂ O en suspensión con fotoactivación; a) algodón sin catalizador; b) algodón recién inmovilizado; c) algodón después de 7 usos	51
Figura 14. Pruebas SEM de muestras poliéster: algodón funcionalizadas con TiO ₂ y fotoactivadas, tomadas de Velasco E (2014) [25].....	52
Figura 15. Análisis SEM en textiles de algodón inmovilizados con catalizador usando espaciador; a) recién inmovilizado; b) después de cinco lavados. Tomado de Galkina et. al, (2014) [40]	52
Figura H1. a) Actividad fotocatalítica durante tres reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,4 [gTiO ₂ /L H ₂ O], en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m ² . b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo durante la reacción	75
Figura H2. a) Actividad fotocatalítica durante tres reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,8 [gTiO ₂ /L H ₂ O], en función del tiempo. Para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m ² . b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo durante la reacción	76
Figura H3. a) Actividad fotocatalítica durante cinco reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,8 [gTiO ₂ /L H ₂ O+ luz UV] en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m ² . b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo dado durante la reacción)	77
Figura J1. Muestra de algodón sin TiO ₂	81
Figura J2. Muestra de algodón con TiO ₂ sin reuso	81
Figura J3. Muestra de algodón con TiO ₂ después de 7 reúsos	82

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis de varianza factorial.....	48
Tabla I1. Número de reúsos logrados por cada combinación de factores. CS: Concentración en suspensión; FA: Fotoactivación del textil	79
Tabla I2. Resultado de las sumas de cuadrados totales (SST), de cada uno de los factores (SS(CS) y SS(FA)), de la interacción entre factores (SS(CS-FA)) y del error (SSE)	80

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ruta de variación y decisión para experimento auxiliar.....	67
Anexo B. Tabla de composición química del algodón.....	68
Anexo C. Ficha técnica del algodón utilizado como soporte para la inmovilización del TiO_2	69
Anexo D. Etapas del proceso de funcionalización de 4 recortes de algodón.....	70
Anexo E. Cámara iluminada con lámparas UV, empleada para cubrir la pecera e irradiarla durante el proceso de recubrimiento por inmersión y caracterización de las lámparas.....	71
Anexo F. Proceso microbiológico.....	72
Anexo G. Curva de referencia a condiciones de oscuridad, sin algodón ni fuente de carbono	74
Anexos H. Actividad fotocatalítica de textiles modificados con TiO_2	75
Anexos I. Cálculos para el análisis de varianza	78
Anexos J. Análisis EDS para muestras de algodón	81

RESUMEN

TÍTULO: INCREMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE FIBRAS TEXTILES MODIFICADAS CON TiO_2 EN LA DESINFECCIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON *E. coli* EN UN REACTOR CAPTADOR PARABÓLICO COMPUESTO*

AUTORES: MÓNICA PATRICIA CABALLERO ESPARZA; DEISY MILENA MARTÍNEZ RUGELES**

PALABRAS CLAVES: Fotodesinfección, Fotocatalizador, Inmovilización de TiO_2 , Mecanismo SODIS, Textil fotobactericida, Fotodegradación, Catálisis heterogénea, Reactor captador parabólico compuesto (CPC)

DESCRIPCIÓN:

Gran parte de las fuentes hídricas en zonas rurales de Colombia se encuentran contaminadas con microorganismos patógenos causando enfermedades mortales principalmente en niños menores de 4 años. Lo anterior evidencia la necesidad de un mecanismo de desinfección fácilmente adaptable y que no genere subproductos de desinfecciones mutagénicos y cancerígenos. En el centro de investigación en catálisis (CICAT), de la Universidad Industrial de Santander se han desarrollado trabajos enfocados en la potabilización del agua a través de catálisis heterogénea mostrando resultados prometedores con textiles bactericidas a escala laboratorio, sin embargo, la vida útil de los textiles no superaba los tres reusos limitando su aplicabilidad. Por esta razón, este proyecto se enmarca en el aumento de la vida útil de este tipo de textiles a nivel planta piloto. Para esto se planteó la inmovilización de un fotocatalizador (TiO_2) con inmersión discontinua sobre un soporte resistente a las reacciones de fotodegradación (algodón). Se usaron diferentes concentraciones de fotocatalizador en suspensión con el fin de disminuir aglomeraciones y por ende la lixiviación del mismo durante la desinfección. Por otro lado, se fotoactivo el textil aplicando luz UV con el fin de generar grupos polares que propician la formación de un enlace covalente entre el fotocatalizador y el algodón. Los textiles se probaron desinfectando agua previamente contaminada con *E-Coli*, esta reacción se llevó a cabo en un reactor captador parabólico compuesto (CPC) nivel piloto. El seguimiento de la reacción se efectuó midiendo la concentración bacteriana y se identificó la cantidad de TiO_2 en el textil durante varios reusos. El textil que presentó el mejor desempeño fue el inmovilizado en presencia de luz UV con la menor concentración de TiO_2 en suspensión 0,4 [g/L], el cual alcanzó 7 usos en condiciones íntegras. Mediante pruebas SEM se evidenció homogeneidad y estabilidad del catalizador sobre el textil.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya Ingeniero químico, Ph.D. Codirectora: Luz Marina Ballesteros Rueda. Ingeniera química, M Sc., Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: INCREASE OF THE USEFUL LIFE OF TEXTILE FIBERS MODIFIED WITH TiO_2 IN THE DISINFECTION OF WATER CONTAMINATED WITH *E. coli* IN A COMPOUND PARABOLIC RECEPTOR REACTOR*

AUTHORS: MÓNICA PATRICIA CABALLERO ESPARZA; DEISY MILENA MARTÍNEZ RUGELES**

KEYWORDS: Photodisinfection, Photocatalyst, Immobilization of TiO_2 , SODIS mechanism, Photobactericidal textile, Photodegradation, Heterogeneous catalysis, Compound parabolic collector reactor (CPC)

DESCRIPTION:

Many of the water sources in rural areas are contaminated with pathogenic microorganisms, causing deadly diseases, mainly in children under 4 years of age. The above evidences the need for a disinfection mechanism easily adaptable and does not generate byproducts of mutagenic and carcinogenic disinfections. In the Catalysis Research Center (CICAT), of the Industrial University of Santander works have been developed focused on water purification through heterogeneous catalysis showing promising results with bactericidal textiles at laboratory scale, however, the useful life of the textiles no more than three reuses, limiting its applicability. For this reason, this project is part of the increase in the useful life of this type of textiles at the pilot plant level. For this, the immobilization of a photocatalyst (TiO_2) with discontinuous immersion on a support resistant to photodegradation reactions (cotton) was considered. Different concentrations of photocatalyst in suspension were used in order to reduce agglomerations and therefore the leaching during the disinfection. On the other hand, the textile is photoactive applying UV light in order to generate polar groups that favor the formation of a covalent bond between the photocatalyst and the cotton. The textiles were tested disinfecting water previously contaminated with *E. Coli*, this reaction was carried out in a pilot level parabolic collector reactor (CPC). The monitoring of the reaction was carried out by measuring the bacterial concentration and the amount of TiO_2 in the textile was identified during several reuses. The textile that presented the best performance was the immobilized in the presence of UV light with the lowest concentration of TiO_2 in suspension 0.4 [g / L], which reached 7 uses in full conditions. SEM tests showed homogeneity and stability of the catalyst on the textile.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical. Engineering Shool of Chemical Engineering. Director: Hernando Guerrero Amaya Ingeniero químico, Ph.D. Co-director: Luz Marina Ballesteros Rueda. Ingeniera química, M Sc., Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Un informe de la Global Water Partnership (GWP), afirma que casi un tercio de los recursos hídricos renovables del planeta están en Suramérica. Tres países latinoamericanos aparecen entre los 10 primeros en el listado de las naciones que cuentan con la mayor cantidad de agua en el mundo, Brasil (primero), Colombia (tercero) y Perú (octavo) [1]. Sin embargo, las fuentes hídricas tienden a ser alteradas con materia orgánica, plaguicidas, fertilizantes, sustancias químicas, entre otros [2]. Según el Banco Mundial, en Latinoamérica tres cuartas partes de las aguas fecales o residuales retornan a fuentes hídricas generando problemas de salud pública [3]. La Organización mundial de la salud (OMS) afirma que, en todo el mundo, al menos 1800 millones de personas se abastecen de una fuente de agua contaminada por heces que puede transmitir enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. La deficiencia en los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano se asocia a enfermedades responsables de aproximadamente el 30% de casos de mortalidad en América Latina, porcentaje seis veces superior al de los países desarrollados [4]. En Colombia se han registrado 1'786.545 casos de enfermedad diarreica aguda en lo que va del año 2017 de los cuales el mayor número se observa en menores de 5 años en zonas rurales, siendo éstas carentes de tecnologías para tratar volúmenes pequeños de agua [5]. Sin embargo, las tecnologías de tratamiento para grandes volúmenes de agua o abastecimientos en zonas urbanas también presentan inconvenientes para la salud humana debido a que el principal método de desinfección (eliminación de microorganismos patógenos) es la adición de compuestos clorados, los cuales generan subproductos de desinfección o por sus siglas en inglés (DBPs) mutagénicos y cancerígenos [6]. Dependiendo de la fuente y calidad del agua, pueden aplicarse procesos de potabilización mecánicos, biológicos, físicos, térmicos, químicos o sus combinaciones. La desinfección del agua, etapa del proceso de potabilización esencial para prevenir la propagación de enfermedades infecciosas, se realiza usando ampliamente compuestos clorados

en tecnologías de potabilización para pequeños y grandes volúmenes, incluso con las consecuencias que esto conlleva. Con el fin de evitar estos problemas, es necesario mejorar la calidad del agua creando una tecnología accesible, asequible, eficiente y amigable con el medio ambiente. Se han planteado métodos de desinfección físicos, como ósmosis inversa, microfiltración, ultrafiltración, entre otras. Soluciones prometedoras, pero simplemente transfieren el contaminante a otros medios generando una contaminación secundaria. Por otro lado, las soluciones fundamentadas en métodos químicos tales como, aplicación de luz UV, ozonificación y procesos de oxidación avanzada o por sus siglas en inglés (AOPs), suscitan un mecanismo prometedor de desinfección. Sin embargo, los tratamientos con UV y ozonificación son costosos y no se pueden adaptar fácilmente a zonas rurales. Por tanto, las AOPs resultan ser la mejor alternativa para la potabilización del agua [7].

La fotocatalisis y la electro-fotocatalisis son AOPs que desempeñan un papel crucial en el tratamiento del agua, ya sea como procesos independientes o como opciones de post-tratamiento. Estas tecnologías se caracterizan por la formación de radicales altamente oxidantes capaces de degradar casi todos los compuestos orgánicos a dióxido de carbono y agua [8].

La fotodesinfección es un proceso AOP que genera bastante expectativa debido a su aprovechamiento de luz solar y eficiencia en la eliminación de microorganismos patógenos presentes en agua con menos o incluso ninguna formación de DBPs. Éste proceso de desinfección se describe como una fotocatalisis heterogénea basada en el uso de un semiconductor que se activa con cierta cantidad de energía [6]. Fujishima y Honda (1972) descubrieron la división fotocatalítica del agua con electrodos de dióxido de titanio (TiO_2) [7], desde entonces se ha realizado un complejo estudio con el TiO_2 y se establece como el semiconductor más usado en la catálisis de fotorreacciones, ya que es no tóxico, de bajo costo, altamente eficiente y presenta fotoestabilidad a largo plazo [9].

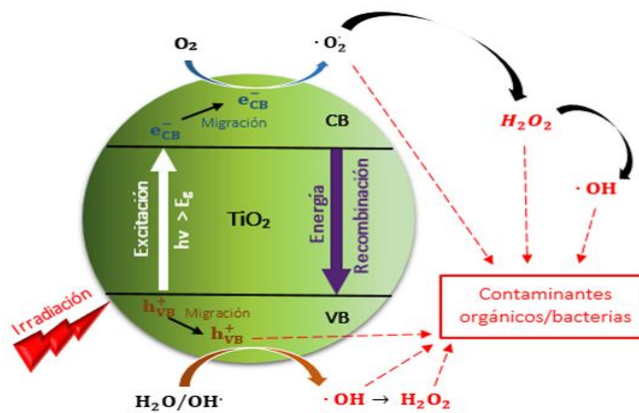
El TiO_2 se caracteriza por tener una banda de valencia llena y una banda de conducción vacía. Cuando la banda de valencia recibe un fotón con una energía mayor o igual que la brecha energética (band gap) 3,2 eV (solo un pequeño porcentaje de luz solar correspondiente a la franja ultravioleta cumple esta condición) un electrón (e^-) será excitado y promocionado a la banda de conducción, dejando un agujero (h^+) en la banda de valencia. Los pares electrón-hueco (e^-)-(h^+) migran a la superficie del catalizador para reaccionar con el medio circundante (especialmente agua y oxígeno diatómico) y formar especies altamente oxidantes o por sus siglas en inglés (ROSs). Las especies altamente oxidantes son radical hidroxilo (OH^\bullet), anión superóxido (O^{2-}), oxígeno singlete y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). El mecanismo de oxidación fotocatalítica incluye cuatro pasos los cuales se esquematizan en la figura 1 [10]:

- i) Absorción de luz por parte del fotocatalizador para conversión de energía luminosa a energía química, llevando a cabo la formación de pares electrón-hueco.
- ii) Separación y recombinación. El electrón foto-excitado se inyecta en la banda de conducción, llevando a la separación de los pares electrón hueco. Sin embargo, estas especies cargadas pueden recombinarse* en el interior o en la superficie del catalizador.
- iii) Reacciones de oxidación en los (h^+). El hueco migra a la superficie del catalizador, allí adsorbe grupos hidroxilo presentes en el medio (agua) que funcionan como donadores de electrones formándose un radical hidroxilo (OH^\bullet).
- iv) Reacción de reducción en (e^-). Normalmente el O_2 disuelto actúa como aceptor de electrones, este es adsorbido en la zona cargada del catalizador la cual ha

* La recombinación es una reacción desfavorable e inmediata (picosegundos) que se da por la interacción de las especies cargadas en el campo de coulomb para formar especies neutras, así los electrones se termalizan disipando su energía cinética inicialmente alta al medio circundante (generación de calor) formando una distribución espacial alrededor de sus cationes parentales; la recombinación es la irreversibilidad del proceso fotocatalítico

migrado a la superficie para aceptar un electrón y formar un anión superóxido. El (O_2^-) experimenta múltiples reacciones posteriores convirtiéndose en H_2O_2 y a su vez en OH^\cdot altamente reactivo. La oxigenación del medio compensa el problema de la recombinación. Solo cuando se completa la reacción redox (estabilización del catalizador excitado, pasos iii y iv) ocurre desorción y difusión de las especies reactivas formadas en la superficie del catalizador, generando las reacciones posteriores sugeridas.

Figura 1. Mecanismo de reacción fotocatalítica del TiO_2 [1]



Fuente: Taicheng et al. (2017)[6]

Se han utilizado otros semiconductores como CdS , ZnO , WO_3 y PbS para fotocatalisis heterogénea, pero se consideran inestables, tóxicos o menos activos catalíticamente [11]. Matusnaga et al. (1985) descubrieron los efectos antibacterianos del TiO_2 [7], y en los últimos años se ha usado como fotocatalizador en aplicaciones industriales, de salud o para mineralizar contaminantes orgánicos peligrosos remediando el aire y el agua [12].

Éste semiconductor representa una solución a problemas relacionados con la calidad del agua, pero existen ciertas limitaciones para su aplicación eficiente a gran escala [13]. La falta de claridad en el mecanismo de inactivación de los

microorganismos, que impide la elaboración de un modelo cinético viable y la dispersión del catalizador en el agua que condiciona a post-tratamientos de recuperación, son las principales limitaciones reportadas [8].

Los microorganismos patógenos comúnmente presentes en el agua contaminada son *Escherichia coli* (*E. coli*), *Salmonella sp.* y *Cholera sp* [8]. La principal causa de muerte de estos microorganismos en fotodesinfección es atribuida al estrés oxidativo causado por los ROSs. Existen varias paradojas con respecto a esto, ya que los microorganismos aerobios y anaerobios facultativos tienen enzimas que neutralizan los ROSs mitigando el daño oxidativo [14]. Sin embargo, estas enzimas se desarrollan naturalmente en un solo sitio de la célula y los ataques por los ROSs formados en la fotodesinfección ocurren en múltiples sitios, lo que lleva a una vulnerabilidad celular con respecto a estos [15]. Sun et al. (2017) detectaron la causa y el orden en que ocurre la desinfección en *E. coli* (Principal representante de las enterobacterias y caballo de batalla para estudios en laboratorio) y atribuyen el efecto bactericida a una elevación drástica de los ROSs en el medio circundante. La membrana bacteriana es el primer foco de ataque (peroxidación lipídica) por parte de los ROSs generando permeabilidad en la misma, seguido del daño en la cadena respiratoria y pérdida de la generación de adenosina trifosfato o por sus siglas en inglés (ATP). El daño en la cadena respiratoria no es letal ya que el microorganismo cuenta con formas alternas para la producción de energía. La pérdida completa de la capacidad de síntesis de ATP indica que todas las vías del mecanismo energético se encuentran por completo bloqueadas, así, puede considerarse a la pérdida de la generación de ATP como el golpe mortal al microorganismo [16].

Por otro lado, el TiO_2 cambia las propiedades organolépticas del agua potable, por ende, la recuperación post-tratamiento del catalizador dispersado es necesario, pero conlleva a un costoso proceso de filtración de material nano particulado [17].

Con lo anterior se evidencia la necesidad de inmovilizar el catalizador y para su viabilidad el soporte debe tener bajo costo, no liberar elementos químicos durante la etapa de revestimiento que afecten la fotodesinfección y soportar la degradación fotocatalítica. Para llevar a cabo dicho proceso se han propuesto una variedad de soportes como vidrio, carbón activado, material de sílice, materiales poliméricos y textil. Los textiles de algodón son una alternativa viable, ya que son económicos y no generan subproductos tóxicos tanto en la etapa de reacción como en la etapa de revestimiento [18].

Funcionalizar textiles de algodón expone una solución para la aplicación a gran escala de la fotodesinfección. En el centro de investigaciones en catálisis (CICAT-UIS), se han obtenido resultados relevantes a nivel laboratorio usando fibras textiles con TiO_2 inmovilizado para la desinfección de *E. Coli* [19,20, 21], por tal razón dicha investigación avanzó con pruebas a escala piloto [22] y los resultados fueron prometedores en cuanto a la desinfección, pero la baja vida útil de los textiles con propiedades bactericidas genera un gran inconveniente con miras a aplicar esta tecnología.

Se conocen dos causas dominantes en la baja vida útil de textiles fotobactericidas, ensuciamiento del catalizador con los productos de la degradación biológica y lixiviación del mismo durante la reacción de desinfección [23]. El ensuciamiento del catalizador no genera un problema permanente, ya que dichos productos suelen adsorberse de forma débil sobre los sitios activos generando especies altamente reactivas que suelen estabilizarse enseguida resultando en desorción inmediata de dichos compuestos [9]. Sin embargo, la unión de textiles con partículas del fotocatalizador es insuficiente lo que impone un problema con respecto a la estabilidad y durabilidad de los sistemas nanocompuestos durante su uso [24]. San y Wesley (2003), atribuyeron la disminución de la actividad fotocatalítica al desprendimiento de TiO_2 que se genera a medida que se lleva a cabo el reuso. Desde entonces se han venido desarrollando diferentes estudios

encaminados a mejorar la adherencia de las nanopartículas al textil [25]. Daoud et al. (2005), inician las contribuciones de inmovilización de nanopartículas de TiO_2 en algodón aplicando el método de revestimiento con sol-gel sometido a diferentes temperaturas, encontrando que a altas temperaturas se genera un enlace covalente entre grupos carboxílicos presentes en la celulosa y el TiO_2 . También se evidencia concentraciones bajas de anatasa resultado atribuido a la preparación del sol-gel [26]. La baja presencia de anatasa conduce a un mínimo rendimiento cuántico, ya que las otras formas alotrópicas de TiO_2 (rutilo y brookita) son más propensas a la recombinación, por ende, la eficiencia del efecto fotocatalítico decae [9]. Kiwi et al. (2005), Trabajaron en el uso de espaciadores que fortalecieran la unión de las nanopartículas en el algodón sin modificar su cristalización. El espaciador consiste en ácidos con más de un grupo carboxílico, los cuales se unen tanto al TiO_2 como a la fibra de algodón generando un enlace éster bastante resistente. Álvarez y Polo. (2012), trabajaron con ácido succínico (como espaciador) en desinfección, logrando distribución homogénea del catalizador en el textil. Sin embargo, las imágenes SEM muestran alta aglomeración en la capa formada. La aglomeración de TiO_2 sobre el textil disminuye la eficiencia bactericida reduciendo el área superficial activa. Por otro lado, las fuerzas de atracción entre clústeres de TiO_2 suelen aumentar a medida que se incrementan en masa contrarrestando las fuerzas de adhesión entre el complejo textil-espaciador y catalizador [27]. Bozzi et al. (2005) y Mejía et al. (2009), realizaron activación del textil como pretratamiento de la inmovilización de TiO_2 con el fin de crear grupos polares (cetonas, aldehídos y ácidos carboxílicos) sobre la celulosa para generar una fuerte atracción del óxido metálico sin uso de espaciador. La activación fue realizada por aplicación de radiofrecuencia (RF-plasma), MW-plasma y radiación UV al vacío con el fin de mejorar el efecto bactericida y la vida útil del textil. Con esto se logró una distribución de capa muy delgada minimizando aglomeraciones y mejorando la homogeneidad de las nanopartículas de TiO_2 sobre el textil [28-29].

Se necesita evitar aglomeraciones de las nanopartículas de TiO_2 inmovilizadas sobre el textil y realizar activación previa del algodón para generar un anclaje del catalizador con enlaces químicos más fuertes. Existen modernos métodos que generan mayor estabilidad en los textiles inmovilizados. Sin embargo, aumentan su complejidad, costo de manufactura y se desarrollan a escala laboratorio.

La inmovilización estable de partículas de TiO_2 en superficies de algodón también depende de las metodologías de inmovilización y acabado [18]. Existen diversas técnicas de inmovilización de TiO_2 en soportes tales como: recubrimiento por inmersión, spread coating, tratamiento térmico y deposición química de vapor [30]. En este proyecto de investigación se escoge el método discontinuo de inmersión para la inmovilización del catalizador sobre el textil. Es un proceso simple, de bajo costo y asegura alta eficiencia [31]. Éste proceso inicia con la inmersión de la fibra en una suspensión (mezcla de catalizador y solvente) bajo un tiempo de residencia con el fin de alcanzar una interacción entre el sustrato (fibra) y la solución de recubrimiento (suspensión) [32]. Una película de solución precursora (catalizador) se forma sobre el soporte al retirarlo de la inmersión, la cual se consolida mediante el secado y las reacciones químicas acompañantes. Para obtener el material de revestimiento final, es necesario un paso adicional de curado o sometimiento a altas temperatura^{*}. Desde un punto de vista físico, el proceso de formación de la película se basa en un equilibrio mecánico entre la película arrastrada y el líquido de recubrimiento; el equilibrio está gobernado por varias fuerzas, las más importantes son la resistencia viscosa y la fuerza de gravedad [33].

^{*} El sometimiento a altas temperaturas genera una reacción de eliminación [35], lo que lleva a que el complejo de textil y catalizador (unidos por los grupos polares previamente formados) sea obligado a soltar una molécula de agua aumentando la posibilidad de formación de un enlace éster.

Por otro lado, para aumentar la fuerza de adhesión entre el catalizador y el textil se realiza fotoactivación del textil con luz UV durante su inmersión en suspensión (método ya propuesto por Velazco 2014) [34] con el fin de generar doble efecto:

- i) Oxidación de la celulosa por parte de los radicales libres formados en la superficie del TiO_2 durante la radiación. Los grupos hidroxilo de la celulosa (Ver figura 2) poseen la reactividad típica de los alcoholes [35], sin embargo, los compuestos orgánicos no poseen carga, por ende, su reactividad no hace referencia a la pérdida de electrones si no a la oxidación-reducción. En presencia de un agente oxidante el grupo OH del carbono 6 de la glucosa (reactividad de alcohol primario) puede oxidarse 2 veces pasando por aldehído hasta ácido carboxílico y los grupos OH de los carbonos 2 y 3 (reactividad propia de alcohol secundario) se oxidan solo una vez hasta convertirse en cetona [36].
- ii) La adhesión del TiO_2 se da gracias a las fuertes atracciones generadas por parte de los grupos polares formados en la celulosa debido a la oxidación previa. El TiO_2 posee gran afinidad con ácidos carboxílicos, cetonas y aldehídos [8]

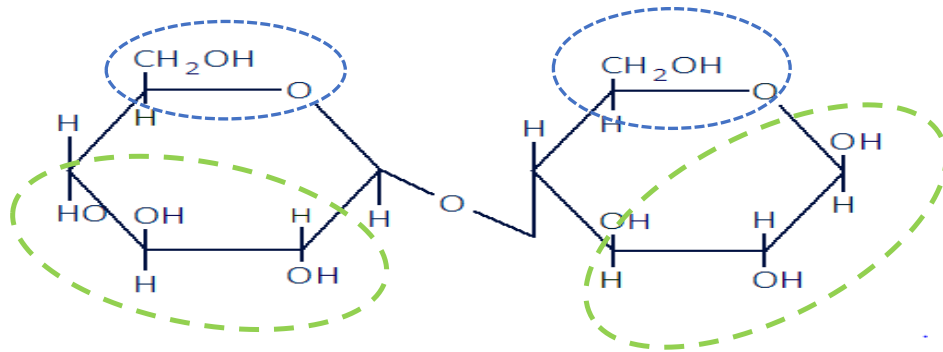
También se disminuye la concentración de TiO_2 en suspensión con el fin de disminuir el exceso y con esto la formación de aglomeraciones [37].

Para llevar a cabo este proyecto de investigación se establece como objetivo general aumentar la vida útil de fibras textiles modificadas con TiO_2 para la desinfección de aguas contaminadas con *E. coli*, en un reactor captador parabólico compuesto (CPC). Cumpliendo con los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Identificar el efecto de la cantidad de dióxido de titanio inmovilizado en la lixiviación del catalizador.
- ✓ Aumentar la adhesión de TiO_2 realizando fotoactivación del textil con luz UV.

- ✓ Evaluar el número de reusos logrados, realizando fotodesinfección de agua contaminada con *E. coli* en un reactor captador parabólico.

Figura 2. Celobiosa. Dímero repetitivo de la celulosa formado por dos moléculas de glucosa unidas por un enlace β D-1,4 glucosídico*

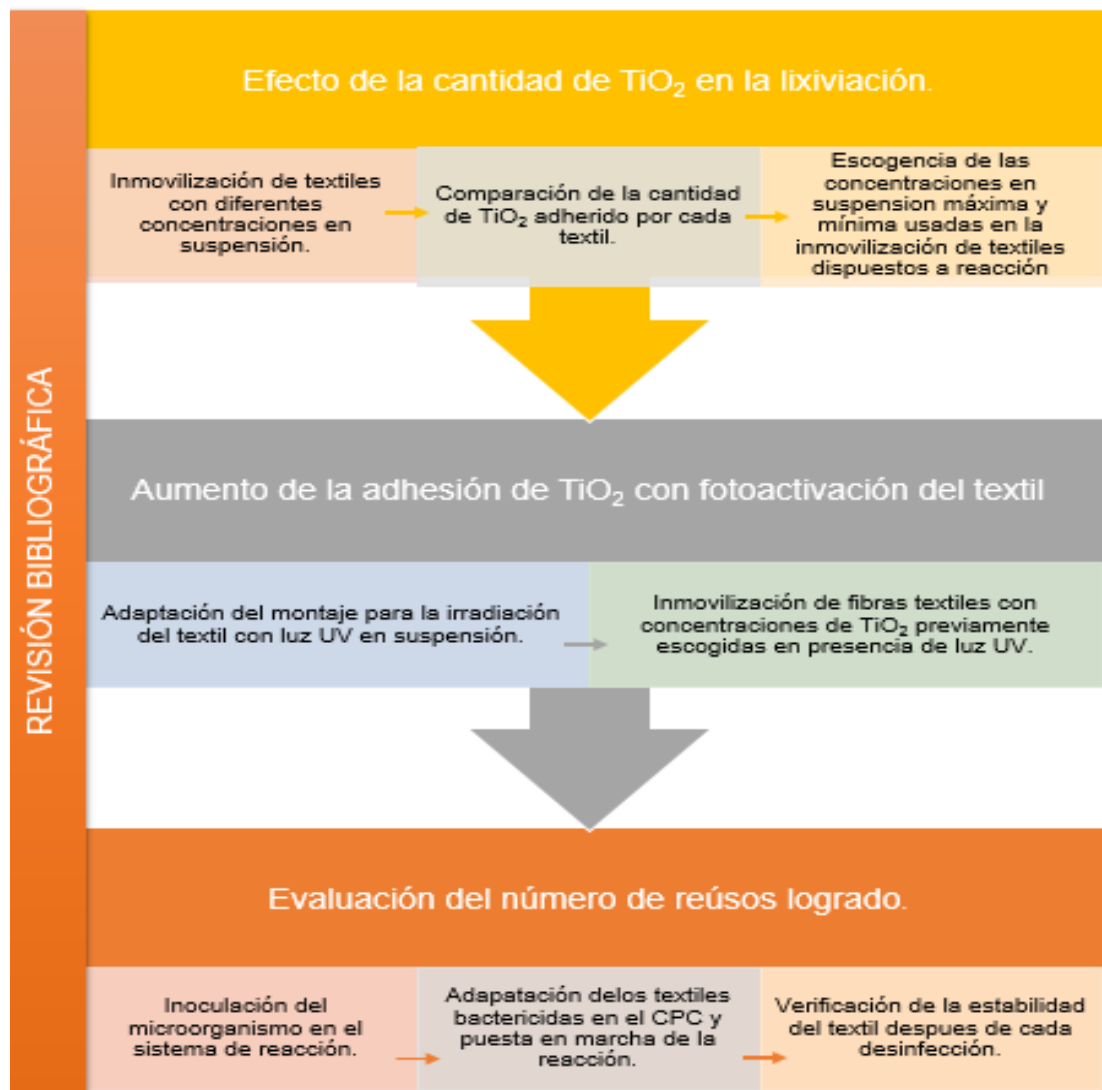


* Los grupos hidroxilo encerrados en azul son los que se asemejan a alcoholes primarios y los encerrados por el círculo verde a alcoholes secundarios.

1. METODOLOGÍA

A continuación, se esquematizan los pasos llevados a cabo en el desarrollo de este proyecto de investigación

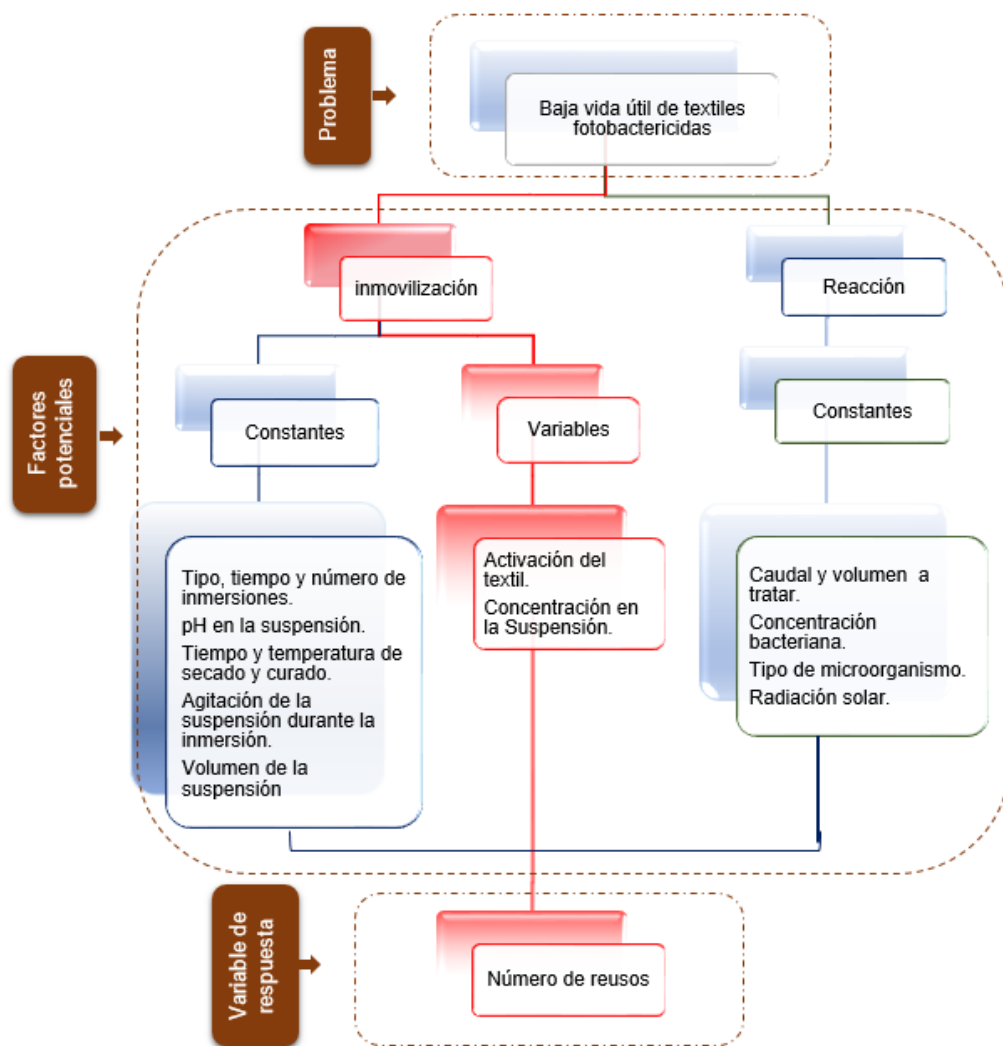
Figura 3. Etapas metodológicas



1.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En la figura 4 se presentan los parámetros que influyen directamente con el problema a tratar, y se describe la ruta (en rojo) de variación que se lleva a cabo para argumentar la propuesta teórica abordada en la introducción.

Figura 4. Esquema de los factores directamente relacionados con el problema a tratar

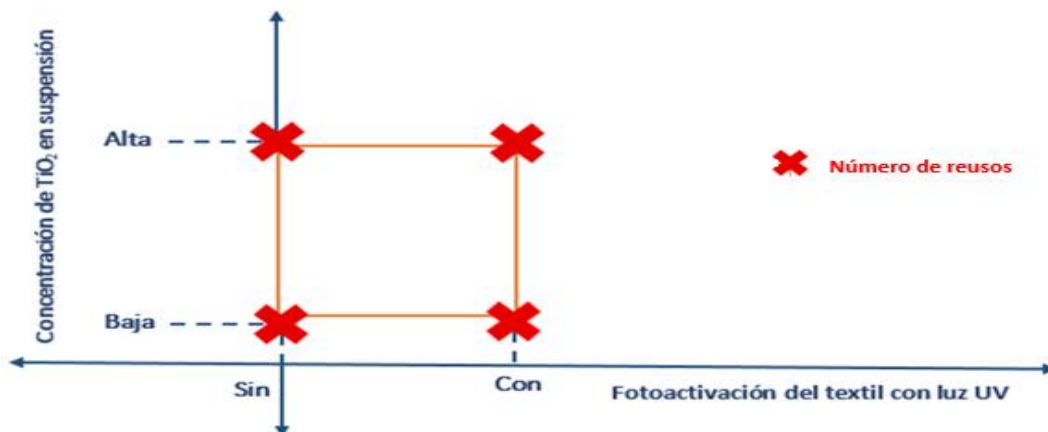


La ruta de variación incluye dos factores a analizar, la activación del textil y la concentración en suspensión. Para identificar los efectos individuales y la interacción de cada factor con respecto a la variable respuesta (número de reúsos), es necesario decidir los niveles de variación conforme a lo requerido (aumento en el número de reúsos).

Se identifica la mínima concentración en suspensión posible de forma experimental para compararla con una concentración mayor y con esto identificar la relación del exceso de catalizador inmovilizado en el textil (aglomeraciones formadas) con el número de reúsos. También se comparan inmovilizaciones con y sin fotoactivación del algodón con el fin de verificar la relación de dicho parámetro con la solución del problema.

En la figura 5, se expone la representación geométrica del diseño experimental. Cada punta de las "x" presentes en el diagrama representa un valor de la variable respuesta; este valor se obtiene después de llevar a cabo una corrida experimental, así, se definen 4 réplicas por cada combinación de niveles en un diseño experimental de dos factores con dos niveles de variación.

Figura 5. Representación geométrica del diseño de experimento



1.1.1 Niveles de Variación. Los niveles de variación de la fotoactivación del textil son sencillos, consisten en comparar textiles inmovilizados con y sin luz UV como se esquematiza en la figura 5. Por otro lado, encontrar los niveles de variación de la concentración requiere de un experimento auxiliar que se describe a continuación.

Niveles de variación en la concentración de TiO_2 en suspensión: para determinar los niveles de variación de la concentración de TiO_2 en suspensión (mínimo y máximo), se realiza un experimento comparativo variando solo un factor determinante (concentración en suspensión). El exceso de catalizador sobre el textil se atribuye directamente a la concentración en suspensión. Disminuir la concentración en suspensión resulta ser una alternativa viable para comprobar la relación del exceso de catalizador inmovilizado sobre el textil y la lixiviación del mismo durante la reacción. En el anexo A se esquematizan los factores potenciales relacionados con el exceso de catalizador inmovilizado, la ruta de variación en este experimento auxiliar y la variable respuesta.

Para calcular la concentración mínima de TiO_2 en este experimento, se debe tener en cuenta una acotación presente en la variable respuesta referente a la cantidad mínima de TiO_2 sobre el textil [37]. Camargo y Oróstegui. (2017) establecen como cantidad mínima 0,35 [g] de TiO_2 por textil para desinfección efectiva con las mismas condiciones aquí usadas. Con base en esto se realizan pruebas experimentales contiguas que consisten en inmovilizaciones variando en forma decreciente la concentración de TiO_2 [p/v] en suspensión cada 0,2 gramos en el intervalo (0,8-0,2) [g/L]. Se trabaja con este intervalo de variación ya que concentraciones mayores a 1 [g/L] no generan un aumento significativo de la cantidad de TiO_2 sobre el textil [25] y los textiles inmovilizados con concentraciones menores o iguales a 0,1[g/L] no evidencian presencia de catalizador [38].

1.2 SECCIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se expone la forma en la que se llevaron a cabo los experimentos ya planteados. Tanto el principal que resuelve el problema del bajo número de reusos como el auxiliar que establece los niveles de variación de concentración de TiO_2 en suspensión.

1.2.1 Materiales. El catalizador escogido es TiO_2 Degussa P-25, este óxido está compuesto por las fases cristalinas anatasa y rutilo en una proporción 80:60 con una densidad de 3,5 [g/cm^3], superficie específica de 50 ± 15 [cm^2/g] y tamaño promedio de partícula entre 20 y 49 [nm] [7].

De las fibras naturales se escoge el algodón como matriz en la inmovilización de TiO_2 ya que se caracteriza por tener una composición entre 88% y 96% de celulosa (parte de la fibra donde se encuentran los grupos OH) (ver anexo B), sin contenidos lignocelulósicos que interfieran en la deposición del TiO_2 y un bajo porcentaje de sales minerales que disminuyen la actividad de fotodesinfección ocupando los sitios activos del catalizador [36]. La celulosa es un polímero natural cuya unidad repetitiva es la Celobiosa, dos moléculas de glucosa unidas por un enlace β D-1,4 glucosídico. Esta fibra se caracteriza por tener resistencia mecánica, resistencia a la degradación biológica, escasa solubilidad en agua y resistencia a la hidrólisis ácida. El textil usado es algodón Dril súper 8 (100% algodón) adquirido en Comertex, Bucaramanga (ver anexo C); se recortó y fileteó para formar tiras con área de 100×14 [cm^2].

1.2.2 Modificación de textiles mediante la adhesión superficial de partículas de TiO_2

Modificación de textiles con TiO_2 mediante la inmovilización no fotoactivada: se inicia con el lavado de los textiles y posterior secado para retirar impurezas y

calcular un peso base respectivamente. Los textiles se lavan en una solución de NaOH al 0,2 M; luego se sumergen en agua desionizada frotando continuamente para retirar por completo la soda cáustica. Cuando los textiles están libres de NaOH se secan en un horno (Precisión, Thermo Scientific) a 100 ± 7 °C durante 3 horas, transcurrido este tiempo los textiles se retiran del horno y se pesan en una balanza digital (Pioneer, OHAUS CORP, legibilidad de 0,0001 [g] y linealidad de $\pm 0,3$ [mg]) por triplicado con el fin de evadir el efecto de la humedad sobre el peso. Para preparar la suspensión se toman 20 [L] de agua desionizada sobre los cuales se vierte determinada cantidad de TiO_2 según la concentración que se desee preparar. La suspensión formada se homogeniza en un Ultra Turrax (T 65 Basic, IKA) que opera a 4000 rpm durante 30 minutos con el fin de reducir aglomeraciones. Posteriormente se regula el pH usando ácido clorhídrico fumante al 37% (Merck) manteniéndolo en un valor de 2,5. La medida de pH se realiza con un medidor de pH (Thermo Scientific). El pH protona las partículas de TiO_2 , lo que genera repulsión entre ellas manteniendo homogénea la suspensión [10]. Por último, se modifican los textiles con el método de recubrimiento por inmersión a modo discontinuo con 2 inmersiones (1 hora por inmersión)*. La inmovilización inicia con la inmersión de dos textiles equidistantes de forma horizontal. Los textiles se acoplan a un soporte de aluminio y se sumergen en un contenedor (pecera) de $(105 \times 15 \times 20)$ [cm³] con una suspensión a determinada concentración de TiO_2 . Durante la inmersión se mantiene el pH en 2,5. Pasada una hora, las fibras se extraen de la suspensión rápidamente con el objetivo de generar un menor drenaje y por ende recubrimientos más gruesos [39]. Posteriormente las telas se secan a 100 ± 7 °C durante 3 horas. Luego se lleva a cabo el choque térmico, es decir, las telas se pasan de forma inmediata a una mufla precalentada a 120 °C y se dejan allí por 10 minutos. A continuación, se les aplica baño ultrasónico con agua desionizada durante 15 min en el equipo (Ultrasonic Cleaner Elma E120H), con el objetivo de retirar partículas de TiO_2 débilmente adheridas.

* El número de inmersiones se establece teniendo en cuenta el tiempo necesario para alcanzar la saturación de TiO_2 en el textil encontrado por Velazco. E (2014) [25].

Se realiza de nuevo inmersión, secado, curado y baño ultrasónico a las mismas condiciones para completar el número de inmersiones propuesto. Finalmente, los textiles se secan durante 3 horas y se pesan por triplicado con el fin de comparar el peso del textil antes y después de inmovilizar. Para prevenir la sedimentación de las nanopartículas durante la inmersión, además de regular el pH, se usaron 3 agitadores magnéticos a 1300 rpm (generando agitación de 130 rpm/L) bajo la pecera (ver anexo D).

Modificación de textiles con TiO_2 mediante la inmovilización fotoactivada: la modificación de estos textiles cuenta con los mismos pasos de la inmovilización no fotoactivada relatada en la sección inmediatamente anterior con dos variantes. La primera variante es la presencia de una caja de madera forrada en papel aluminio y equipada con 6 lámparas de mercurio conocidas comercialmente como lámparas de luz negra. Esta caja se dispone sobre la pecera cubriendo por completo el arreglo de inmersión; las dos inmersiones se realizan en presencia de esta radiación. Las lámparas de mercurio se utilizan como fuente de luz UV. En el anexo E se muestra la caracterización de la luz irradiada y el arreglo de la caja de madera. La segunda variante hace referencia al pH de la suspensión. Debido a que la presencia de luz UV en la inmersión propicia la formación de compuestos protonados, el pH de la misma disminuye de forma significativa, por ende, debe mantenerse en 2,7.

1.2.3 Evaluación de la Actividad Fotocatalítica de los Textiles Modificados

Aspectos microbiológicos: el microorganismo usado para comprobar el efecto bactericida del material funcionalizado es *Escherichia coli* ATCC 11229. Este microorganismo se encontraba criopreservado en microtubos CRYOBANK™ dentro de un freezer a $-70^{\circ}C$, localizado en el centro de investigaciones en enfermedades tropicales (CINTROP) de la Universidad Industrial de Santander. Para corroborar la identidad del microorganismo se realizó caracterización con

pruebas bioquímicas (Por parte del laboratorio de la facultad de salud), aislamiento en agar MacConkey y tinción de GRAM.

Cultivo y crecimiento del microorganismo: se inició con un proceso de activación de la bacteria, inoculando dos perlas con *E. coli* (criopreservada en CRYOBANK™) en 20 [ml] de caldo de cultivo Luria Bertani (LB) estéril, compuesto por triptona (Oxoid) al 1% [p/v], extracto de levadura (Oxoid) al 0,5% [p/v] y NaCl (Carlo Erba) al 1% [p/v]. Posteriormente se incubó bajo condiciones constantes de agitación a 100 rpm y a una temperatura de 37°C durante un periodo de 24 horas a condiciones aerobias. Luego se diluyó en 244 [ml] de medio de cultivo estéril y se mantuvo a las mismas condiciones ambientales durante 18 horas con el objetivo de alcanzar la fase estacionaria (ver anexo F; figura F1).

Preparación de la suspensión bacteriana utilizada en las pruebas de fotodesinfección: para generar la concentración inicial microbiológica en el reactor se tomaron 132 [ml] del caldo bacteriano en fase estacionaria y se distribuyeron equitativamente en 12 tubos, después se llevaron a la centrifuga (Thermo Scientific™ MediLite™) a 3100 rpm durante 15 minutos y se retiró el sobrenadante. Sobre los lodos resultantes (biomasa) se adicionaron 5 [ml] de solución salina estéril (0,85% [p/v]) por cada tubo y se homogenizó en un agitador (Vortex V1 plus BOECO). La mezcla resultante se concentró en seis tubos con las contribuciones equitativas de dos tubos iniciales. Los seis tubos se centrifugaron de nuevo bajo las mismas condiciones durante 15 minutos y se eliminó el sobrenadante en cada uno. Posteriormente se adicionaron 5 [ml] de agua destilada a los lodos resultantes, se homogenizaron en vortex y finalmente se inocularon en el reactor Captador Parabólico Compuesto (CPC) con 14 litros de agua destilada.

Reacción de desinfección: para comprobar el efecto bactericida de las telas de algodón inmovilizadas con TiO₂ Degussa P25, se hizo el montaje de las fibras funcionalizadas en el reactor CPC SOLWATER+AGUACAT ACADUS-2008/0,6

(ECOSYSTEM S.A, España). Por cada tubo del reactor (compuesto por cuatro tubos de borosilicato que tienen en su interior, a través de la zona anular, tubos de PVC sobre los cuales se adapta cada textil) se coloca una tira de textil modificada con TiO_2 . Cada una de estas telas es una réplica de la prueba de desinfección, ya que se someten a las mismas condiciones de radiación con luz solar (parámetro que no se puede controlar y hace que una corrida no se pueda replicar). Se tomó una muestra antes de inocular las bacterias en los catorce litros de agua destilada, con el fin de verificar si existen microorganismos en el agua o en las telas funcionalizadas. Subsiguientemente las bacterias se inoculan en el reactor y luego se toma otra muestra. Después se cubre el reactor por un periodo de 3 minutos (periodo de oscuridad) para que la bacteria se adapte al medio, pasados los 3 minutos se toma una alícuota. Finalmente se expone el reactor a luz solar, se toman muestras del agua contaminada y se registra la intensidad acumulada e instantánea cada 15 min, 30 min, 60 min y luego cada hora. La reacción acaba cuando se completa una intensidad lumínica acumulada de $70 \text{ [Wh/m}^2\text{]}$ necesaria para alcanzar desinfección completa [28]. La radiación solar fue medida con un radiómetro ACADUS 85-PLS (ECOSYSTEM S.A.; España) el cual provee datos de energía incidente $[\text{W/m}^2]$ y energía incidente acumulada $[\text{Wh/m}^2]$ a longitudes de onda entre 300 y 400 nm (radiación UVA). Las muestras se analizaron por un procedimiento estándar de dilución en serie y recuento en placa con la técnica de microgota. Cada siembra se hizo por duplicado en agar de recuento (Merck). De cada dilución se sembraron $20 \text{ [}\mu\text{L]}$, se incubaron a 37°C durante 18 horas y se hizo recuento en placa de las colonias sobrevivientes. (ver anexo F; figura F2). Con el fin de comparar el efecto bactericida del catalizador se realizaron dos curvas de referencia. La primera con una prueba de desinfección a fibras textiles de algodón sin TiO_2 , bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente. La segunda, una curva de crecimiento con la misma concentración inicial inoculada en el reactor, pero a condiciones de oscuridad y sin textil, con el fin de identificar el comportamiento del microorganismo expuesto al movimiento mecánico del reactor y el agua destilada sin fuente de carbono (alimento).

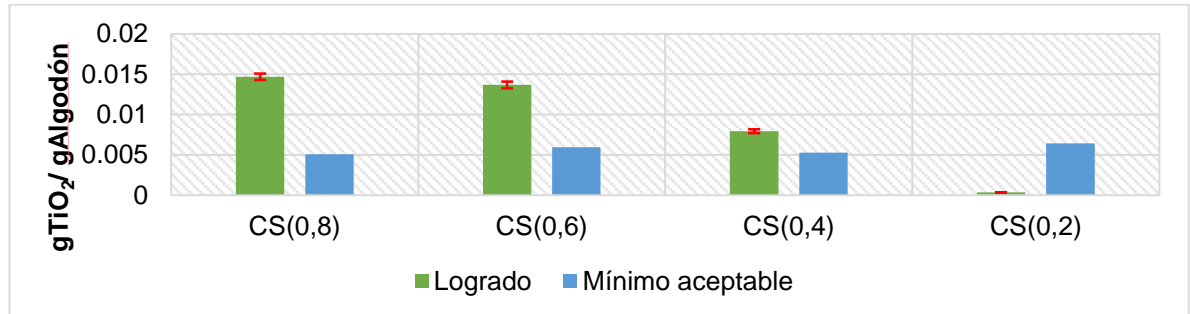
1.2.4 Estabilidad de las Muestras. Para identificar la estabilidad del textil a medida que aumentaba el número de reúsos se verificó el desempeño bactericida y el peso de la misma por cada corrida. Después de una prueba de desinfección, los textiles se lavaron con abundante agua desionizada para retirar posibles restos de biomasa y se llevaron a un proceso de secado por 3 horas. Posteriormente se pesaron en la balanza digital (Pioneer, OHAUS CORP, legibilidad de 0,0001 [g] y linealidad de $\pm 0,3$ [mg]) para identificar la cantidad de TiO_2 restante.

2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE TiO_2 EN SUSPENSIÓN

Se inicia este análisis con la identificación de la más baja concentración de TiO_2 en suspensión para lograr al menos 0,35 g de TiO_2 sobre cada textil. En la figura 6. se aprecia la cantidad de TiO_2 lograda para inmobilizaciones con diferentes concentraciones en suspensión (CS). Para la concentración de 0,8 [$\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$] es decir CS (0,8) en la gráfica, el exceso de TiO_2 logrado con respecto al mínimo es bastante apreciable. El TiO_2 inmobilizado disminuye de forma abrupta cuando se analizan las inmobilizaciones de CS (0,4) con respecto a CS (0,6). Sin embargo, este cambio abrupto se sigue presentando al llegar a CS (0,2) teniendo una cantidad menor a la mínima permitida. Se observó que durante la inmobilización con CS (0,2) las partículas de catalizador presentaban más afinidad con el contenedor de suspensión (vidrio) que con el textil. La inmobilización lograda con CS (0,4) supera el mínimo permitido y reduce en gran medida el exceso que se observa en CS (0,8). Con lo anterior se concluye que la concentración en suspensión mínima que se puede trabajar (en base a los valores aquí propuestos) es 0,4 [$\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$], en ese orden de ideas, los niveles de variación de la concentración para el experimento principal serían: 0,4 [$\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$] como el más bajo y 0,8 [$\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$] como el más alto.

Figura 6. TiO_2 adherido en textiles inmovilizados con diferentes concentraciones en suspensión por el método de inmersión discontinua sin fotoactivación del textil

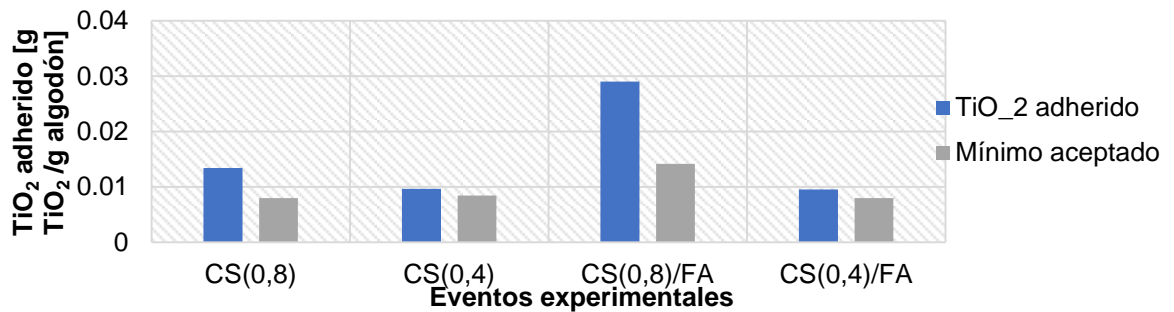


2.2 DESEMPEÑO BACTERICIDA

2.2.1 Inmovilización de los Textiles. En la figura 7 se aprecia la cantidad (promedio de las cuatro réplicas) de TiO_2 adherido a los textiles. Se garantiza la cantidad mínima de catalizador en cada una de las inmovilizaciones. También se observa gran exceso en el textil inmovilizado con suspensión de 0,8 [g TiO_2 /LH₂O] en presencia de luz UV (CS (0,8) /FA), y un mínimo exceso en las inmovilizaciones de 0,4 [g TiO_2 /LH₂O] con y sin fotoactivación.

2.2.2 Reacción y Estabilidad del Material. En la figura 8 se presentan los resultados de inactivación de *E. coli* durante el primer uso de textiles de algodón modificados con (0,8 y 0,4) [g/L] de TiO_2 en suspensión, con y sin fotoactivación. Estos resultados son comparados con algodón sin catalizador (prueba SODIS) y una curva de referencia en oscuridad.

Figura 7. TiO_2 adherido en textiles inmovilizados con diferentes concentraciones en suspensión por el método no fotactivado y fotoactivo (FA).



Como se mencionó en la sección 1.2.3 la curva de referencia en oscuridad indica una posible muerte bacteriana generada por un factor alterno a la fotodesinfección. Debido a que el medio en el que se lleva a cabo esta reacción carece de alimento (agua destilada) y presenta movimientos mecánicos (bomba y válvulas), existe la posibilidad de inhibición bacteriana. Sin embargo, se corroboró que dichos eventos no causan efecto sobre la célula durante el tiempo de reacción (ver anexo G)

A diferencia de los textiles modificados, la curva de reacción para textiles libres de TiO_2 presenta una fase de adaptación y crecimiento durante los primeros 20 minutos. La presencia de catalizador disminuye el tiempo de reacción necesario para alcanzar desinfección completa, pasando de 240 min en telas sin catalizador a menos de 180 minutos en telas funcionalizadas. Se debe tener presente que el efecto del catalizador va más allá de la disminución del tiempo de reacción y ausencia de la fase de adaptación en comparación con la prueba SODIS. La desinfección por parte de los textiles funcionalizados expone un tiempo de muerte efectiva de 24 horas, es decir, se hicieron pruebas de oscuridad posterior a la desinfección total con el agua resultante, y se corroboró que después de 24 horas no existió rebrote de *E. coli*. Por otro lado, el efecto del catalizador se extiende a

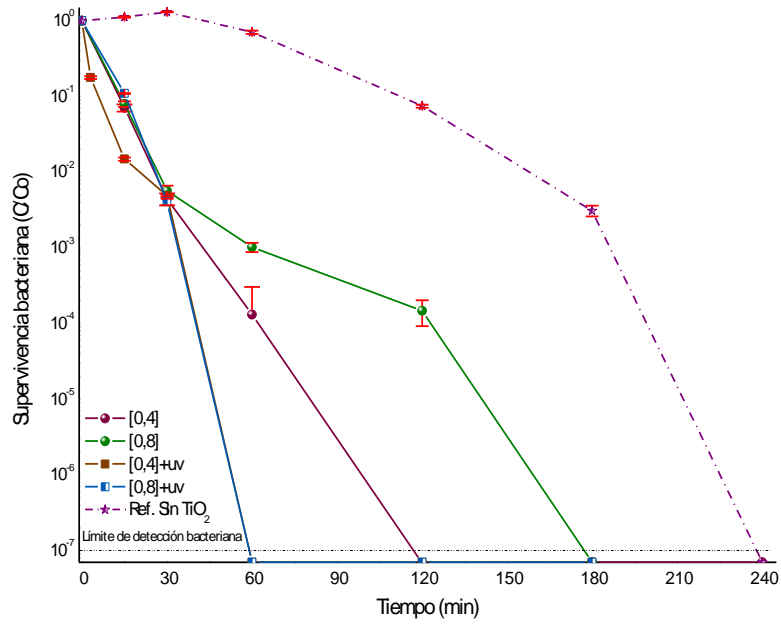
una amplia gama de microorganismos. Estos alcances no se logran con desinfección SODIS [8].

Al comparar la cantidad de TiO_2 adherido por cada método de inmovilización (ver figura 7) y el promedio (teniendo en cuenta las réplicas) del número de reúsos logrado por cada textil (ver figura 9) se evidencia la influencia de la fotoactivación sobre la estabilidad del textil.

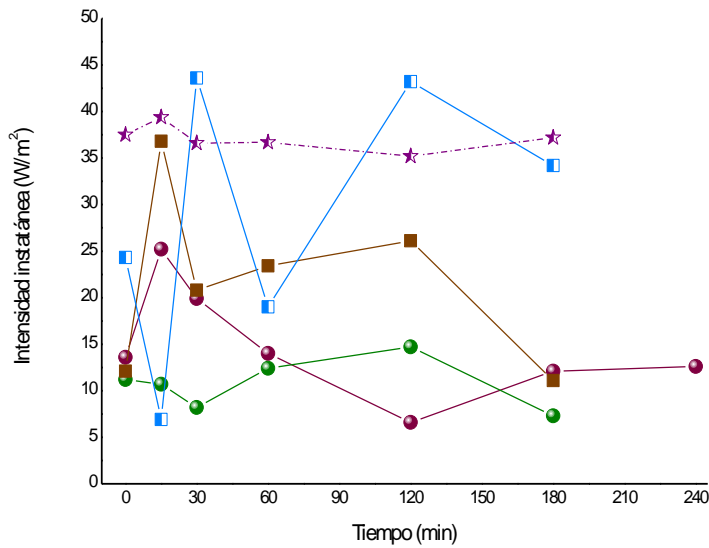
Los reúsos logrados para la inmovilización sin fotoactivación del textil son aproximadamente tres. Sin embargo, los textiles inmovilizados con CS (0,8) presentan un rápido decaimiento de la velocidad de reacción lo que podría significar lixiviación del catalizador (ver sección 2.2.3). La inmovilización con CS (0,4) muestra levemente un mayor número de reúsos. Camargo y Oróstegui (2017) manejaron una concentración en suspensión de 1 [g TiO_2 /L H_2O] [27] logrando tres reúsos. Esto evidencia un avance respecto a la disminución de la concentración en relación con el número de reúsos.

Por otro lado, para inmovilizaciones con fotoactivación del textil el aumento del número de reúsos es realmente marcado. Este número de reúsos es aproximadamente cinco y siete para concentraciones en suspensión de 0,8 y 0,4 respectivamente. Aunque los textiles inmovilizados con CS (0,8) /FA presentan desempeños bactericidas factibles (ver figura H3; anexo H), estos muestran fisuras en algunas de las réplicas, como se corroborará más adelante. Esto puede atribuirse a la cantidad de TiO_2 en exceso adherido sobre estos textiles (figura 7), ya que se aumenta la vulnerabilidad del algodón debido a los agentes oxidantes formados durante la inmersión fotoactivada.

Figura 8. a) Actividad fotobactericida de textiles de algodón funcionalizados durante el primer reuso. b) Comportamiento luz UV solar



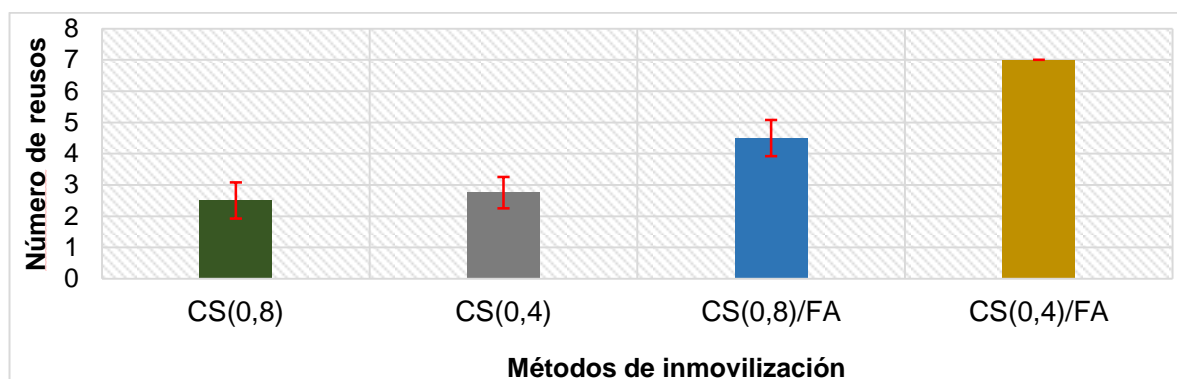
a)



b)

En la figura 10.a se expone el mejor resultado obtenido* con respecto a la actividad fotocatalítica del textil a medida que aumenta el número de reúsos (textiles modificados con concentración de 0,4 [gTiO₂/L H₂O] en suspensión más luz UV). Se observa que la desinfección se lleva a cabo en 60 minutos para los dos primeros usos, sin embargo, los usos siguientes, a diferencia del uso 4, muestran desinfección total a las dos horas.

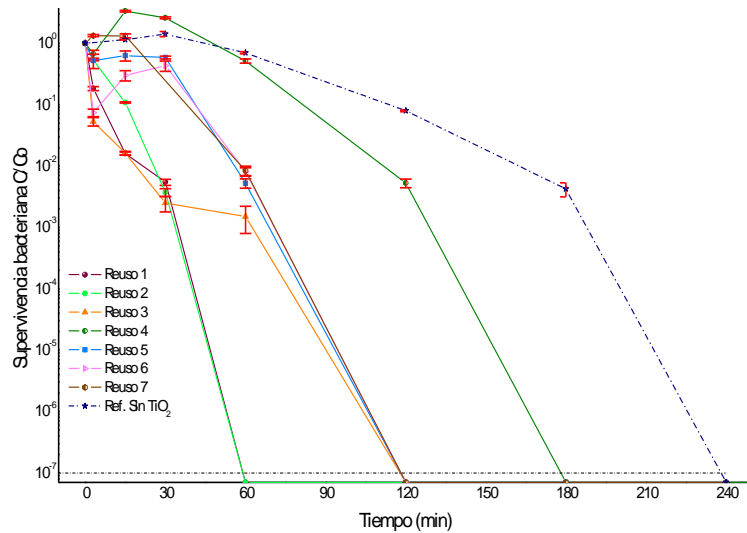
Figura 9. Promedio de número de reúsos logrado por cada textil



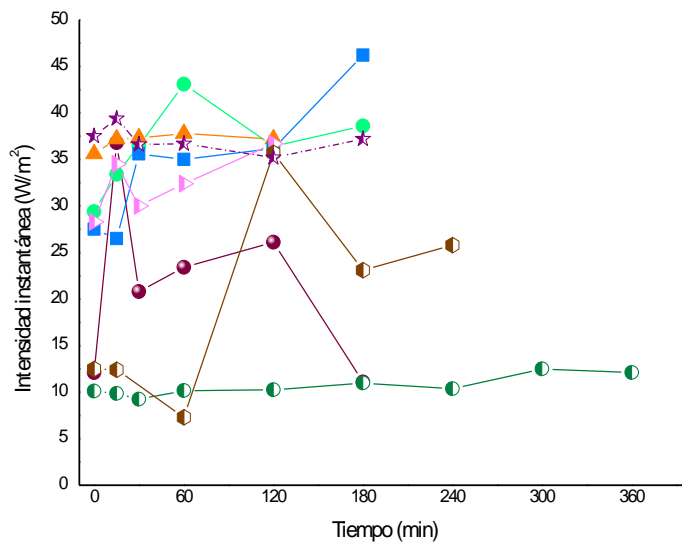
La eficiencia de los primeros usos puede atribuirse a la lixiviación del catalizador en exceso durante la reacción (ver sección 2.2.3), ya que este puede reaccionar en suspensión fomentando celeridad en la desinfección. El uso 4 muestra un rendimiento muy pobre debido a una intensidad lumínica baja (ver figura 10.b). Puede establecerse estabilización del material con una desinfección efectiva a las 2 horas. No obstante, el número de usos se lleva a 7 debido a la aparición de fisuras muy pequeñas sobre los textiles afectando de este modo la integridad del material. La presencia de fisuras en este caso puede atribuirse a la característica rígida que toman los textiles tratados con TiO₂, disminuyendo de este modo la resistencia a la manipulación [18].

* Los resultados para las demás inmovilizaciones se encuentran en el anexo H.

Figura 10. a) Actividad fotocatalítica durante siete reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,4 gTiO₂/l +luz UV, en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m². b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo dado durante la reacción



a)



b)

2.2.3 Lixiviación del Catalizador. La figura 11 muestra la variación de TiO_2 adherido al algodón como consecuencia del reuso. Se observa que a medida que aumentan los usos disminuye la cantidad de TiO_2 . El 87.5% de todas las muestras analizadas (16 con réplicas) no exhibirían funcionalidad después de la primera desinfección según el criterio de TiO_2 mínimo (0,35 [g]) en cada textil. Sin embargo, según la sección inmediatamente anterior la función fotobactericida sigue siendo viable después de la primera desinfección en todos los casos. Por ende, el criterio de TiO_2 mínimo adherido sobre el textil durante la inmovilización resulta ser un criterio válido que expone un exceso favorable para el proceso de inmovilización mas no para el proceso de desinfección. Solo para el caso de la figura 11.d se evidencia estabilización de la cantidad de catalizador sobre el material. Con base en esto se puede relacionar 0,004 g TiO_2 / g algodón como un posible mínimo factible en desinfección.

La disminución de catalizador inmovilizado debido a los usos es bastante marcada para los textiles tratados con la concentración más alta de TiO_2 aquí ensayada y sin fotoactivación (ver figura 11.a). Además, después de la segunda desinfección el catalizador se encuentra en un nivel muy bajo, aproximadamente cero y entra en el rango de ruido generado por la humedad para su medición*. Entonces, aunque se sigue evidenciando funcionalidad del textil, la cantidad de catalizador útil sobre este no es del todo identificada. Por otro lado, los textiles pertenecientes a las réplicas 3 y 4 presentaron degradación después de la segunda desinfección, esto se puede atribuir al ataque sobre la celulosa de especies altamente oxidantes generadas por el exceso de TiO_2 (no útil) disuelto en el agua a tratar, así mientras se realizaba la desinfección se generaba un ataque oxidativo sobre la celulosa. Después de la tercera desinfección todos los textiles presentaban fisuras debido a la degradación. Los textiles inmovilizados con la menor concentración de TiO_2 ,

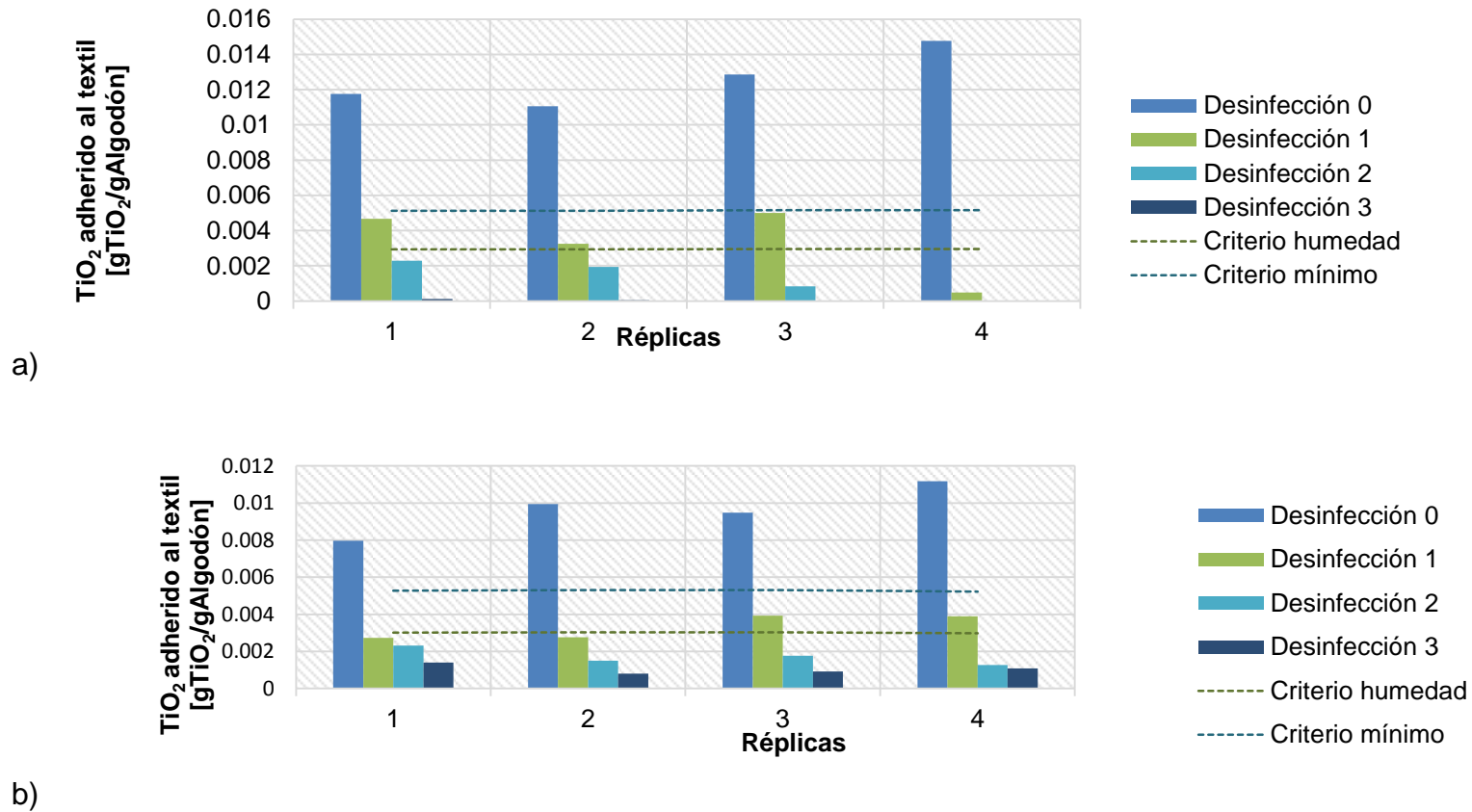
* La humedad adquirida por cada textil durante el pesado se evade con la diferencia del peso por triplicado, sin embargo, cuando la diferencia de peso del textil está por debajo del peso generado por la humedad adquirida se genera ruido en la medición debido a el solapamiento de los pesos.

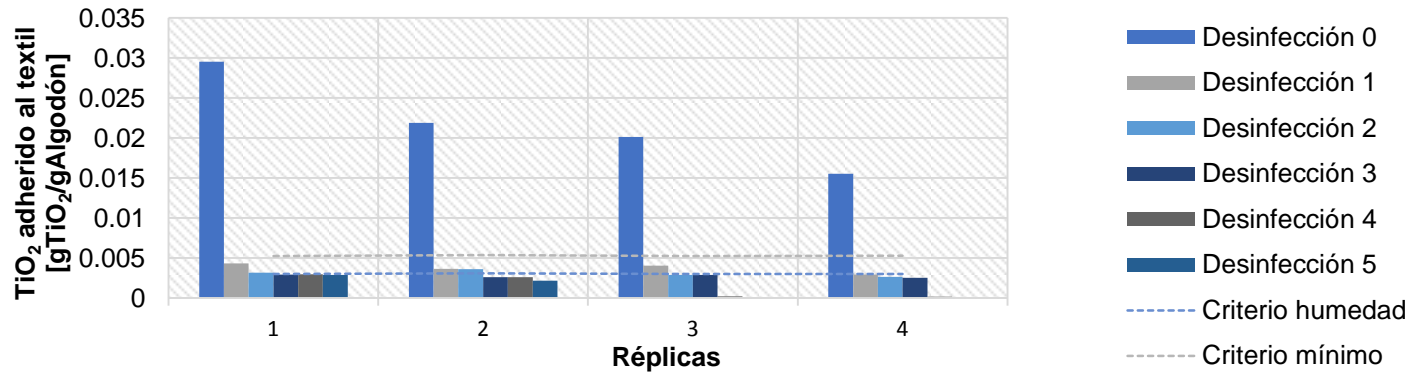
pero sin fotoactivación, presentaron un comportamiento muy similar al mencionado anteriormente.

Al analizar las muestras que fueron tratadas con fotoactivación y mayor concentración, figura 11.c, se ve mejora con respecto a la lixiviación de TiO_2 después de la primera desinfección. La cantidad de catalizador desprendido después del primer uso aún se muestra significativa, pero las desinfecciones siguientes exponen mayor estabilidad de los textiles. No se puede cuantificar con exactitud la cantidad de catalizador activo en el textil debido al límite del criterio de humedad fijado (ruido de medición). Aquí se presentó degradación en 2 réplicas (3 y 4) después de la cuarta desinfección, las otras 2 resistieron solo una desinfección más sin fisuras.

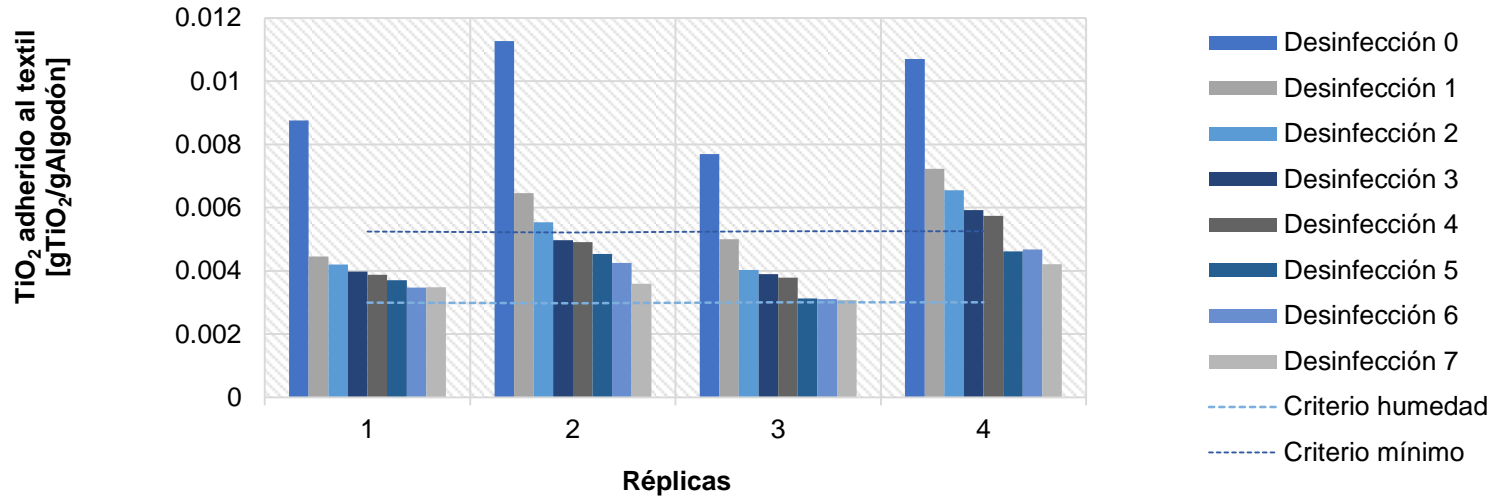
Por último, los textiles inmovilizados con la menor concentración de TiO_2 y en presencia de luz UV, figura 11.d, exhiben un mejor comportamiento. A pesar de la disminución abrupta del catalizador después de la primera desinfección, se evidencia una disminución de catalizador mucho más lenta en desinfecciones posteriores, lo que sugiere mayor estabilidad en los textiles.

Figura 11. Comportamiento de lixiviaciones de TiO_2 para textiles inmovilizados con suspensión de a) 0,8 $\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$, b) 0,4 $\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$, c) 0,8 $\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$ con fotoactivación y d) 0,4 $\text{gTiO}_2/\text{LH}_2\text{O}$ con fotoactivación





c)



d)

2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA

Teniendo en cuenta que el diseño experimental propuesto es completamente aleatorizado, se toma el “modelo de efectos” para la representación de los efectos de la concentración en suspensión, la fotoactivación del textil y sus interacciones sobre el número de reúsos. En la tabla 1 se muestra el análisis de varianza para un modelo de factores fijos. Se compara el F_o experimental con el F teórico de la distribución F (positivamente sesgada) para un α de 0,05. Se tiene que $F_{0,05;1,1}$ es 161,4 lo que indica que solo la fotoactivación genera un efecto apreciable en la variable de respuesta, ya que 170,5 es el único valor que recae sobre la zona crítica rechazando la hipótesis nula (Ver anexo I).

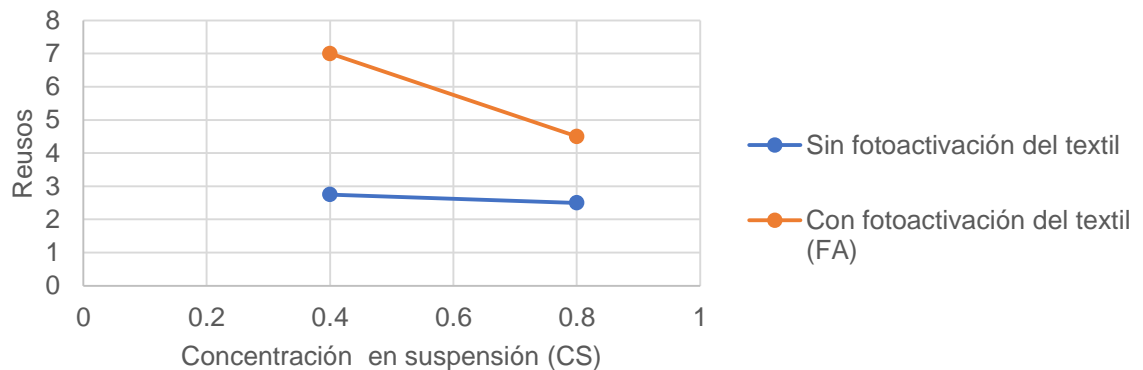
La figura 12 representa las respuestas promedio para cada combinación de los tratamientos realizados. Esta representación facilita la visualización de los resultados obtenidos con el análisis de varianza. Se evidencia que el número de reúsos aumenta de forma significativa con la fotoactivación del textil. La curva sin fotoactivación no presenta una pendiente muy marcada, lo que indica que el cambio de la concentración en suspensión no genera un mayor resultado.

Tabla 1. Análisis de varianza factorial

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_o
Concentración en suspensión	7,6	1	7,6	33
Fotoactivación	39,1	1	39,1	170,5
Interacción	5,1	1	5,1	22,1
Error	2,8	12	0,2	
Total	54,4	15		

Aunque para el análisis poblacional no exista significancia en la interacción de los dos efectos, (debido a la relevancia de la fotoactivación) se evidencia un aumento marcado con la combinación de la menor concentración en suspensión y el textil fotoactivado. A pesar del desplazamiento del efecto de la concentración de TiO_2 en suspensión por parte de la fotoactivación del textil, se debe tener en cuenta la importancia de la relación entre la baja concentración en suspensión y el catalizador inmovilizado en exceso sobre el material. En el proceso de desinfección el exceso de catalizador suele caerse en mayor proporción generando datos erróneos en la efectividad bactericida del material (ver sección 2.2.2), siendo el catalizador ya en suspensión el que esté actuando en la desinfección y no el material propiamente dicho.

Figura 12. Respuestas promedio para cada combinación de los tratamientos realizados



2.4 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

En la figura 13 se presentan imágenes SEM de muestras (1×1) $[\text{cm}^2]$ del textil inmovilizado de (105×14) $[\text{cm}^2]$ con suspensión de $0,4$ $[\text{gTiO}_2/\text{L H}_2\text{O}]$ y fotoactivación. La figura 13 a muestra el textil sin modificar, la figura 13 b el textil

recién modificado y la figura 13 c el textil después de 7 reúsos. El análisis EDS se presenta en el anexo J.

La figura 14, es una prueba SEM de muestras de poliéster-algodón* en relación 65:35 inmovilizadas bajo irradiación UV, la concentración de la suspensión usada fue de 52,63 [gTiO₂/LH₂O] y los textiles de (3x3) [cm²] (escala laboratorio). Al comparar estas imágenes con los resultados aquí obtenidos (textiles inmovilizados con 0,4 [gTiO₂/LH₂O] y fotoactivados) los textiles presentan similar homogeneidad en la distribución del catalizador sobre las microfibras, con la diferencia de que aquí se trabaja a escala piloto y con el 0,76% del catalizador usado a escala laboratorio. De este modo se evidencia la asequibilidad del tratamiento para ser usado en zonas rurales.

Por otro lado, en la figura 15 se presenta la caracterización SEM realizada por Galkina et al. (2014) donde se presenta la distribución de TiO₂ sobre la celulosa después de ser tratada con 1,2,3,4-butanotetracarboxílico (BTCA) como agente reticulante para unir las nanopartículas de TiO₂ a los grupos funcionales de celulosa mediante la formación de enlaces éster [30]. En esta figura se presentan las fibras funcionalizadas antes y después de 5 lavados como a y b respectivamente. Se evidencia una disminución brusca de TiO₂ sobre las fibras celulósicas. Aunque la magnitud del estrujamiento de este lavado no es comparable con el lavado de los textiles inmovilizados aquí realizado, el flujo de agua durante la reacción (fuerzas de arrastre), el tiempo prolongado de exposición del textil en reacción, la manipulación y el contacto con abundante agua desionizada, son análogos al efecto de estrujamiento. Los resultados obtenidos por Galkina et. al (2014), pueden ser comparados con los obtenidos aquí después de siete reúsos (ver figura 13 c); observando mayor presencia de catalizador en los textiles después de ser sometidos a las 7 reacciones con sus respectivos

* El poliéster presenta más afinidad con el TiO₂ debido a la presencia de grupo éster.

lavados, manipulaciones y secados. Con esto se evidencia una fuerte atracción del catalizador con la celulosa, algo muy parecido a un enlace covalente.

Figura 13. Análisis SEM para muestras de algodón inmovilizados con 0,4 gTiO₂ /L H₂O en suspensión con fotoactivación; a) algodón sin catalizador; b) algodón recién inmovilizado; c) algodón después de 7 usos

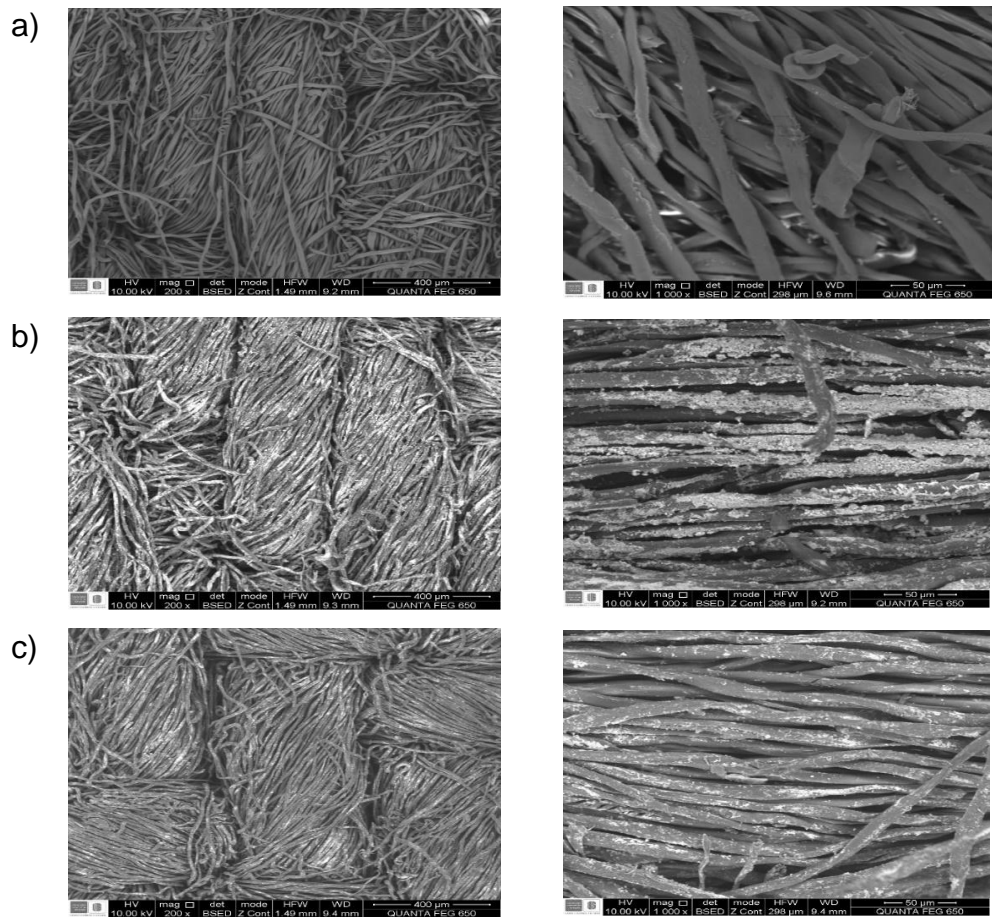


Figura 14. Pruebas SEM de muestras poliéster: algodón funcionalizadas con TiO_2 y fotoactivadas, tomadas de Velasco E (2014) [25]

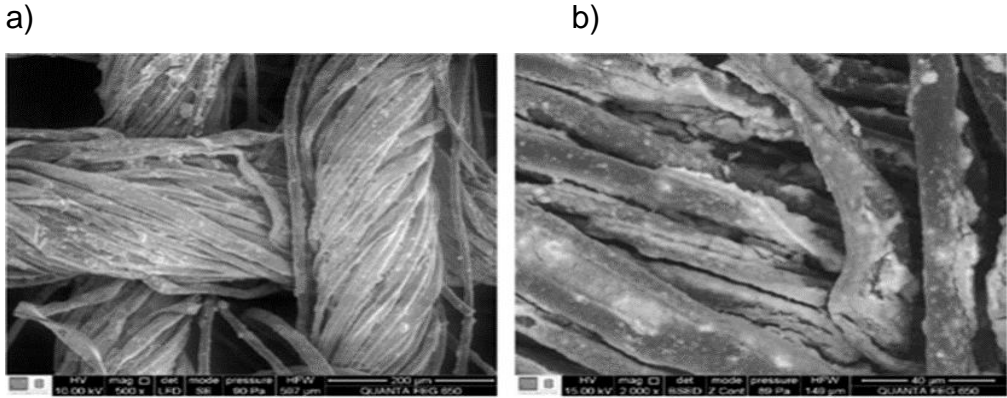
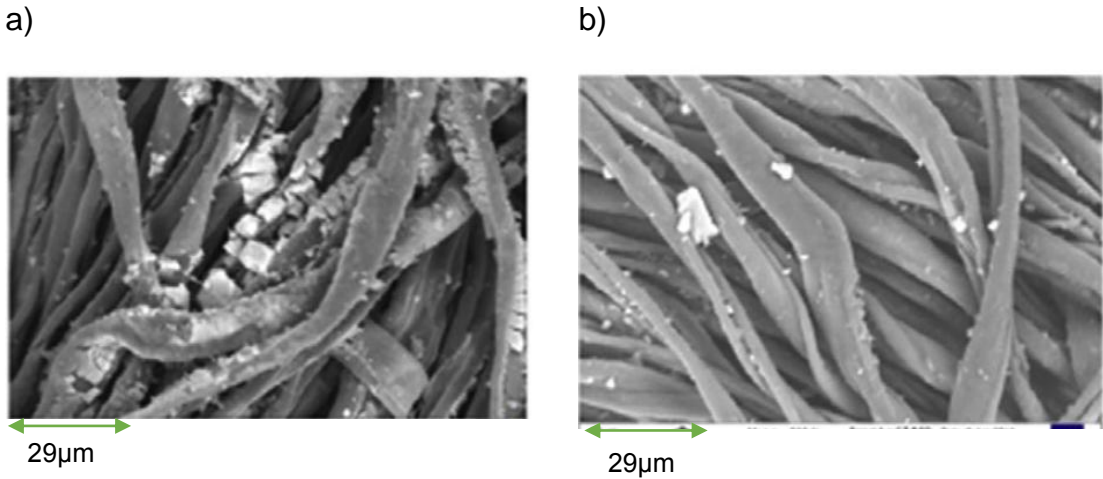


Figura 15. Análisis SEM en textiles de algodón inmovilizados con catalizador usando espaciador; a) recién inmovilizado; b) después de cinco lavados. Tomado de Galkina et. al, (2014) [40]



3. CONCLUSIONES

La baja concentración de TiO_2 en inmersión disminuye el exceso de catalizador inmovilizado que tiende a lixiviarse durante la fotodesinfección.

El efecto principal sobre el aumento de la vida útil del material bactericida se dio por la fotoactivación del textil con luz UV emitida por lámparas de luz negra a 20W, en la etapa de inmovilización con un tiempo de exposición de dos horas por textil.

Se alcanzó un máximo de siete reúsos en fotodesinfección gracias a textiles inmovilizados con la mínima concentración de TiO_2 en suspensión y presencia de luz UV durante la inmersión.

4. RECOMENDACIONES

Se recomienda aumentar la posibilidad de presencia de enlaces covalentes aumentando el tiempo y la temperatura de curado en el proceso de inmovilización. Este aumento deberá hacerse por debajo de los límites de la resistencia de la celulosa.

Debido a que los textiles se degradaron, se recomienda disminuir el tiempo de inmersión en presencia de luz UV para disminuir el efecto nocivo de las especies altamente oxidantes sobre la celulosa.

Se evidencio que cantidades menores a 0,35 g de TiO_2 por textil logran desinfección efectiva, por esto, se recomienda probar textiles en reacción inmovilizados con un concentración en suspensión de 0,2 [g TiO_2 / L H_2O] y así disminuir más la cantidad de catalizador lixiviado durante la desinfección.

5. REFERENCIAS

[1] BANCO MUNDIAL. Brasil, Colombia y Perú, entre los que más agua tiene en el mundo [en línea] 2015. (Consulta: septiembre 2 de 2017) disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2015/03/10/brasil-colombia-peru-paises-mas-agua-tienen-en-el-mundo>

[2] SEGURA TRIANA, Luis Eduardo. Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia. Bogotá, 2007. Informe final de prácticas Administrativas realizadas en cumplimiento del último requisito académico para optar el Título de Administrador Público. Facultad de pregrado. Escuela Superior de Administración pública. Programa en Ciencias Políticas y Administrativas.

[3] BANCO MUNDIAL. Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas [en línea] 2013. (Consulta: septiembre 2 de 2017) disponible en <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>

[4] INSTITUTO NACIONAL DE SALUD, Enfermedades vehiculizadas por agua-EVA e índice de riesgo de la calidad-IRCA en Colombia, 2008-2013. Vigilancia de la calidad de agua para consumo humano. [En línea], 2014. ISBN: 978-958-13-0174-4

[5] Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgo en Salud Pública, Boletín Epidemiológico Semanal. En Instituto Nacional de Salud [en línea]. Boletín semana epidemiológico del 6 al 12 de agosto del 2017. (Consulta: septiembre 2 de 2017) Disponible en: <http://www.ins.gov.co>

- [6] TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 1-16.
- [7] AMETA, Rakshit y AMETA, Suresh C. PHOTOCATALYSIS Principles and Applications. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2017. p. 1-6.
- [8] MEICHTRY, Jorge M y LITTER, Marta I. Renewable Energy Applications for Freshwater Production 1 ed. S.1.: Jochen Bundschuh and Jan Hoinkins CRC Press, 2012. p. 207-238
- [9] NOWOTNY, Janusz. Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion Titanium Dioxide: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2012. p. 323-385.
- [10] AN, Taicheng; SUN, Hongwei y LI Guiying. Photoelectrocatalytic Inactivation Mechanism of Bacteria, dado por TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 239-257.
- [11] IBHADON, Alex O y FITZPATRICK Paul. Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Applications. [Base de datos en línea] marzo 1 del 2013 Revista OALib Journal. 3(1) 189-218 (Recuperado: septiembre 4 del 2017). Disponible en: <http://www.mdpi.com/2073-4344/3/1/189>
- [12] AMETA, Rakshit; AMETA, Suresh C. PHOTOCATALYSIS Principles and Applications. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2017. p, 9-16

- [13] TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. P. 149-160.
- [14] MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M y PARKER, Jack. BROCK BIOLOGÍA DE LOS MICROORGANISMOS. 10 ed. Madrid: PEARSON, s.f. p. 316.
- [15] SUN, Gang. Antimicrobials Textiles. 1 ed. Amsterdam: ELSEVIER, 2016. p. 1-40.
- [16] SUN, Hongwei; LI, Guiying y AN, Taicheng. Bacterial Oxidative Stress Responses and Cellular Damage Caused by Photocatalytic and Photoelectrocatalytic Inactivation, dado por TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 259-270.
- [17] ENTERIA, N y AKBARZADEH, A. Solar energy sciences and engineering applications. 1 ed. London: Taylor & Francis Group. p.67.
- [18] ZHANG, YanYan, et al. Durable antimicrobial cotton textiles modified with inorganic nanoparticles. [Base de datos en línea]. Octubre 2016. Revista Springer Link. Volume 23, p 2791. (Recuperado: Septiembre 14 de 2017). Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-016-1012-0>
- [19] VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO₂ en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

[20] CLARO O, Luis H; Gamboa C, Silvia A. Influencia de las variables del proceso de fijación del complejo sol-gel-SiO₂-TiO₂ en poliéster sobre su actividad fotobactericida. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Santander.

[21] ÁLVAREZ N, Víctor A; POLO C, Belkys J. Funcionalización de textiles mediante la utilización de un espaciador para fijar TiO₂. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Santander.

[22] CAMARGO, Andrea y ORÓSTEGUI, Daniel. Fotodesinfección de agua contaminada mediante TiO₂ inmovilizadas sobre fibras textiles en un reactor CPC. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Santander.

[23] VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO₂ en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 16. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Santander.

[24] REDETIĆ, Maja. Functionalitation of textile materials with TiO₂ nanoparticles. En: Photochemistry and Photobiology: Photochemistry Reviews. 002 (04, 2013); p. 12.

[25] VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO₂ en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 32-37. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Santander.

- [26] W. DAOUD, J; XIN, YI-HE, Zhang. Surface Functionalitation of cellulose fibers with titanium dioxide nanoparticles and their combined bactericidal activities. En: Surf. Sci. 2005, vol.599, p. 69-75.
- [27] S. Ortelli, M. Blosi, S. Albonetti, A. Vaccari, M. Dondi, A.L. Costa. TiO₂ based nano-photocatalysis immobilized on cellulose substrates. En: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. Italia. 2013, vol 276, p. 58-64.
- [28] BOZZI, T. YURANOVA, I. GUASAQUILLO, D. LAUB, L. KIWI. Self-cleaning of modified cotton textiles by TiO₂ at low temperaturas under daylight irradiation. En: J. Photochem. Photobiol., A. 2005, vol. 174, p. 156-164.
- [29] M.I. Mejía, J.M. Marín, G. Restrepo, C. Pulgarín, E. Mielczarski, Y. Arroyo, J-C. Lavanchy, J. Kiwi. Self-cleaning modified TiO₂-cotton pretreated by UVC-light (185nm) and RF-plasma in vacuum and also under atmospheric pressure. En: Appl. Catal., B. 2009, vol. 91, p. 481-488.
- [30] BAUTISTA M, Lorena. Evaluación de la fijación de TiO₂ sobre láminas de pet y su eficiencia en la fotooxidación de fenol. Trabajo de grado, (2013) Universidad Veracruzana.
- [31] AEGERTER, A Michel; MENNING, Martin. Sol-gel technologies for glass producers and users. New York: SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC. (2004) p.37-38. ISBN 978-1-4419-5455-8
- [32] SCHNELLER, Theodor; WASTER, Rainer; KOSEC Marija; PAYNE David. Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films. Vienna: Springer (2013) p. 233. ISBN 978-3-211-99310-1

- [33] SCHNELLER, Theodor; WASTER, Rainer; KOSEC Marija; PAYNE David. Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films. Vienna: Springer (2013) p. 234. ISBN 978-3-211-99310-1
- [34] VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO₂ en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 64-66. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.
- [35] EGE, Seyhan. Química Orgánica Estructura y Reactividad. Tomo 2. Barcelona: REVERTÉ, 2000 p. 1180.
- [36] HEINZE, Thomas. Chemical Functionalization of Cellulose, En: Polysaccharides. Sci.: Severian Dumitriu. 2004. Cap. 23.
- [37] CAMARGO, Andres y ORÓSTEGUI, Daniel. Fotodesinfección de agua contaminada mediante TiO₂ inmovilizadas sobre fibras textiles en un reactor CPC. Bucaramanga, 2017, p. 8. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.
- [38] RINCÓN, Angela y PULGARÍN, Cesar. Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂ Implications in solar water disinfection. En: Applied Catalysis B: Environmental. Lausanne: ELSEVIER, 2004, 51. P. 293-302
- [39] AEGERTER, Michel A; MENNING Martin. Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users. [Base de datos en línea]. 1 st edition 2004. Springer Link, New York. p. 37-43. ISBN 978-1-4419-5455-8
- [40] SUN, Gang. Antimicrobial Textiles. Amsterdam: ELSEVIER, 2016, p. 64.

BIBLIOGRAFÍA

AEGERTER, A Michel; MENNING, Martin. Sol-gel technologies for glass producers and users. New York: SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC. (2004) p.37-38. ISBN 978-1-4419-5455-8

AEGERTER, Michel A; MENNING Martin. Sol-Gel Technologies for Glas Producers and Users. [Base de datos en línea]. 1 st edition 2004. Springer Link, New York. p. 37-43. ISBN 978-1-4419-5455-8

ÁLVAREZ N, Víctor A; POLO C, Belkys J. Funcionalización de textiles mediante la utilización de un espaciador para fijar TiO₂. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

AMETA, Rakshit y AMETA, Suresh C. PHOTOCATALYSIS Principles and Applications. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2017. p. 1-6.

AMETA, Rakshit; AMETA, Suresh C. PHOTOCATALYSIS Principles and Applications. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2017. p, 9-16

AN, Taicheng; SUN, Hongwei y LI Guiying. Photoelectrocatalytic Inactivation Mechanism of Bacteria, dado por TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 239-257.

BANCO MUNDIAL. Brasil, Colombia y Perú, entre los que más agua tiene en el mundo [en línea] 2015. (Consulta: septiembre 2 de 2017) disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2015/03/10/brasil-colombia-peru-paises-mas-agua-tienen-en-el-mundo>.

BANCO MUNDIAL. Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas [en línea] 2013. (Consulta: septiembre 2 de 2017) disponible en <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>

BAUTISTA M, Lorena. Evaluación de la fijación de TiO_2 sobre láminas de pet y su eficiencia en la fotooxidación de fenol. Trabajo de grado, (2013) Universidad Veracruzana.

BOZZI, T. YURANOVA, I. GUASAQUILLO, D. LAUB, L. KIWI. Self-cleaning of modified cotton textiles by TiO_2 at low temperaturas under daylight irradiation. En: J. Photochem. Photobiol., A. 2005, vol. 174, p. 156-164.

CAMARGO, Andrea y ORÓSTEGUI, Daniel. Fotodesinfección de agua contaminada mediante TiO_2 inmovilizadas sobre fibras textiles en un reactor CPC. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

CAMARGO, Andres y ORÓSTEGUI, Daniel. Fotodesinfección de agua contaminada mediante TiO_2 inmovilizadas sobre fibras textiles en un reactor CPC. Bucaramanga, 2017, p. 8. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

CLARO O, Luis H; Gamboa C, Silvia A. Influencia de las variables del proceso de fijación del complejo sol-gel- SiO_2-TiO_2 en poliéster sobre su actividad fotobactericida. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

Dirección de Vigilancia y Análisis de Riesgo en Salud Pública, Boletín Epidemiológico Semanal. En Instituto Nacional de Salud [en línea]. Boletín semana epidemiológico del 6 al 12 de agosto del 2017. (Consulta: septiembre 2 de 2017) Disponible en: <http://www.ins.gov.co>

EGE, Seyhan. Química Orgánica Estructura y Reactividad. Tomo 2. Barcelona: REVERTÉ, 2000 p. 1180.

ENTERIA, N y AKBARZADEH, A. Solar energy sciences and engineering applications. 1 ed. London: Taylor & Francis Group. p.67.

HEINZE, Thomas. Chemical Functionalization of Cellulose, En: Polysaccharides. Sci.: Severian Dumitriu. 2004. Cap. 23.

IBHADON, Alex O y FITZPATRICK Paul. Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances and Aplications. [Base de datos en línea] marzo 1 del 2013 Revista OALib Journal. 3(1) 189-218 (Recuperado: septiembre 4 del 2017). Disponible en: <http://www.mdpi.com/2073-4344/3/1/189>

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD, Enfermedades vehiculizadas por agua-EVA e índice de riesgo de la calidad-IRCA en Colombia, 2008-2013. Vigilancia de la calidad de agua para consumo humano. [En línea], 2014. ISBN: 978-958-13-0174-4

M.I. Mejía, J.M. Marín, G. Restrepo, C. Pulgarín, E. Mielczarski, Y. Arroyo, J-C. Lavanchy, J. Kiwi. Self-cleaning modified TiO₂-cotton pretreated by UVC-light (185nm) and RF-plasma in vacuum and also under atmospheric pressure. En: Appl. Catal., B. 2009, vol. 91, p. 481-488.

MADIGAN, Michael T; MARTINKO, John M y PARKER, Jack. BROCK BIOLOGÍA DE LOS MICROORGANISMOS. 10 ed. Madrid: PEARSON, s.f. p. 316.

MEICHTRY, Jorge M y LITTER, Marta I. Renewable Energy Applications for Freshwater Production 1 ed. S.1.: Jochen Bundschuh and Jan Hoinkins CRC Press, 2012. p. 207-238

NOWOTNY, Janusz. Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion Titanium Dioxide: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. S. 1.: Taylor & Francis Group, 2012. p. 323-385.

REDETIĆ, Maja. Functionalitation of textile materials with TiO₂ nanoparticles. En: Photochemistry and Photobiology: Photochemistry Reviews. 002 (04, 2013); p. 12.

RINCÓN, Angela y PULGARÍN, Cesar. Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂ Implications in solar wáter disinfection. En: Applied Catalysis B: Environmental. Lausanne: ELSEVIER, 2004, 51. P. 293-302

S. Ortelli, M. Blosi, S. Albonetti, A. Vaccari, M. Dondi, A.L. Costa. TiO₂ based nano-photocatalysis immobilized on cellulose substrates. En: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. Italia. 2013, vol 276, p. 58-64.

SCHNELLER, Theodor; WASTER, Rainer; KOSEC Marija; PAYNE David. Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films. Vienna: Springer (2013) p. 233. ISBN 978-3-211-99310-1

SCHNELLER, Theodor; WASTER, Rainer; KOSEC Marija; PAYNE David. Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films. Vienna: Springer (2013) p. 234. ISBN 978-3-211-99310-1

SEGURA TRIANA, Luis Eduardo. Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia. Bogotá, 2007. Informe final de prácticas Administrativas realizadas en cumplimiento del último requisito académico para optar el Título de Administrador Público. Facultad de pregrado. Escuela Superior de Administración pública. Programa en Ciencias Políticas y Administrativas.

SUN, Gang. Antimicrobials Textiles. 1 ed. Amsterdam: ELSEVIER, 2016. p. 1-40.

SUN, Gang. Antimicrobial Textiles. Amsterdam: ELSEVIER, 2016, p. 64.

SUN, Hongwei; LI, Guiying y AN, Taicheng. Bacterial Oxidative Stress Responses and Cellular Damage Caused by Photocatalytic and Photoelectrocatalytic Inactivation, dado por TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 259-270.

TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. P. 149-160.

TAICHENG, An; HUIJUN, Zhao y PO KEUNG, Wong. Advances in Photocatalytic Disinfection: Green Chemistry and Sustainable Technology. 1 ed. Hong Kong: Springer, 2017. p. 1-16.

VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO_2 en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO_2 en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 16. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO_2 en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 32-37. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

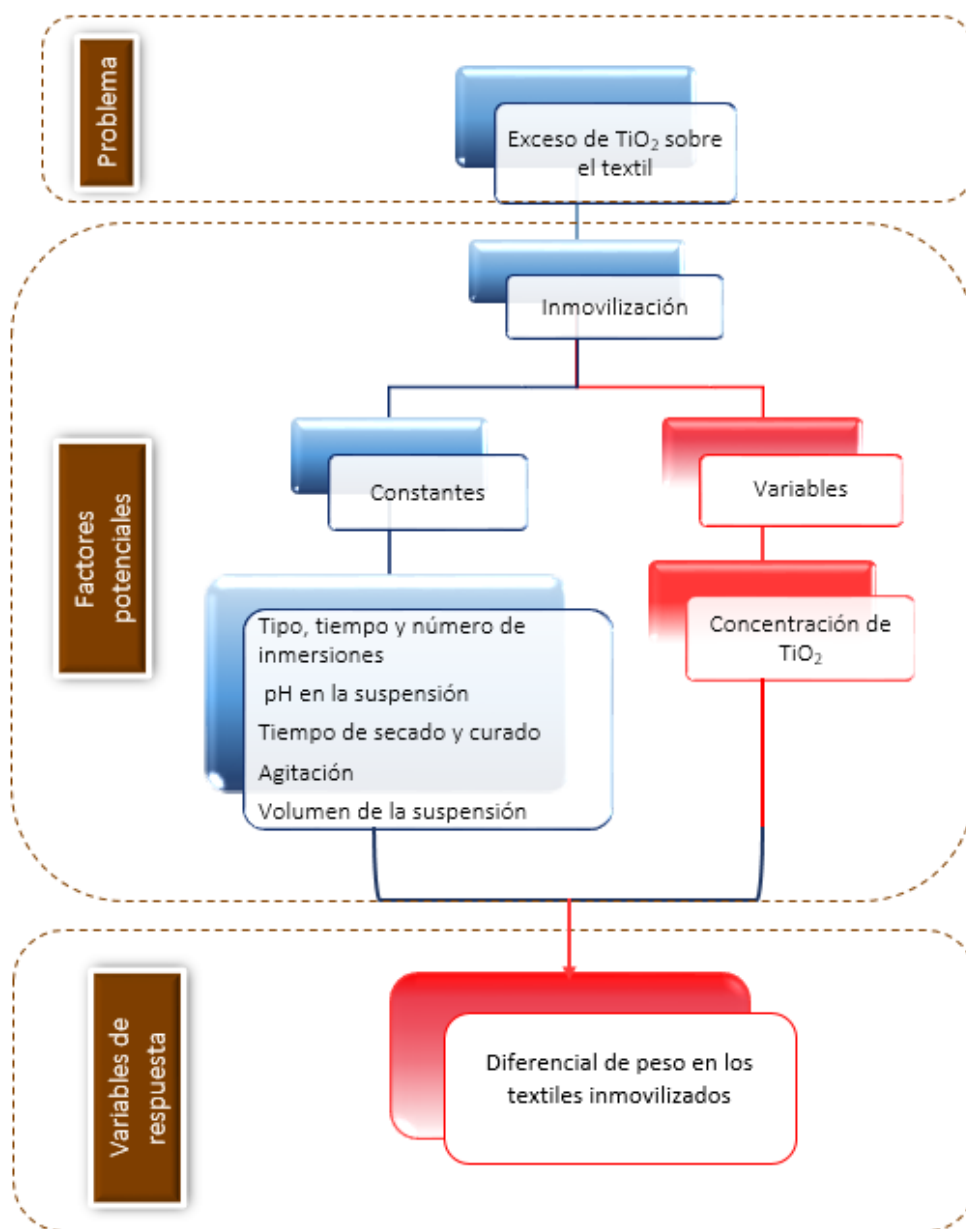
VELASCO, Edwing. Estudio de la inmovilización de TiO_2 en poliéster funcionalizado para el desarrollo de textiles fotobactericidas. Bucaramanga, 2014, p. 64-66. Trabajo de investigación (Magíster en Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Santander.

W. DAOUD, J; XIN, YI-HE, Zhang. Surface Functionalitaton of cellulose fibers with titanium dioxide nanoparticles and their conbined bactericidal activities. En: Surf. Sci. 2005, vol.599, p. 69-75.

ZHANG, YanYan, et al. Durable antimicrobial cotton textiles modified with inorganic nanoparticles. [Base de datos en línea]. Octubre 2016. Revista Springer Link. Volume 23, p 2791. (Recuperado: Septiembre 14 de 2017). Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-016-1012-0>

ANEXOS

Anexo A. Ruta de variación y decisión para experimento auxiliar



Anexo B. Tabla de composición química del algodón

COMPONENTE	TOTAL, DE FIBRA (%)
Celulosa	88.0-96.0
Agua	6.0-8.0
Sales minerales	0.7-1.6
Proteínas	1.1-1.9
Pectinas	0.7-1.2
Ceras	0.4-1.0
Pigmentos-motas	0.5-1.0

Anexo C. Ficha técnica del algodón utilizado como soporte para la inmovilización del TiO₂

FICHA TÉCNICA			
Fecha	Diciembre 03 de 2015		
Referencia	DRIL PUTUMAYO 24595-480/33		
Código			

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO				REQUISITOS ESPECÍFICOS			
Características	Unidades	Valor	Métodos	Características	Unidades	Valor	Método
Composición	%	Algodón 100%	NTC 481 NTC 1213	Ancho Total	cm	160,00 ± 2%	NTC 228
Hilos urdimbre	hilos/pulg	69 ± 3%	NTC 427	Peso	oz/y ² gr/m ²	10,12 ± 4% 343,00 ± 4%	NTC 230
Hilos trama	hilos/pulg	43 ± 5%	NTC 427	Puntos/100 m ²		30	ASTM-5430-A-2

Nota: Los rollos pueden tener una variación en longitud de ±1%

Características	Descripción
Tipo de acabado	ACABADO NO ESMERILADO, PREENCOGIDO/SUAVE
Tipo de tejido	Diagonal 3 x 1 lza
Uso confección	Pantalón informal masculino

ESPECIFICACIONES DE LA TELA				
Parámetro	Unidad	Trama	Urdimbre	Método
Resistencia a la tensión	Min	Libras/fuerza		NTC 754-1
Resistencia al desgarro	Min	Libras/fuerza		NTC 313
Resistencia al deslizamiento de los hilos de los tejidos		Libras/fuerza		
Cambio dimensional		%		NTC 908
Pierna Lavada		%		NTC 5121

INSTRUCCIONES DE LAVADO				
LAVADO (Wash)	BLANQUEADO (Bleach)	SECADO (Dry)	PLANCHADO (Iron)	LAVADO EN SECO (Dryclean)

Anexo D. Etapas del proceso de funcionalización de 4 recortes de algodón



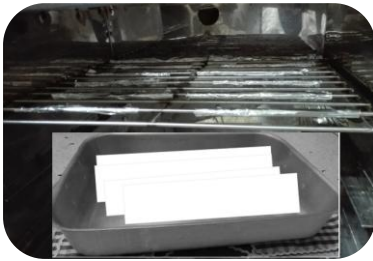
1. **Adaptación del textil** en el soporte



2. **Inmersión** de dos telas por 1 hora



3. **Secado** de las 4 telas (3 horas a 100°C)



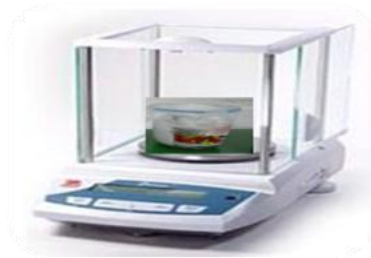
4. **Choque térmico o sinterización** de las 4 telas (10 min)



5. **Ultrasonido** (15 minutos por cada tela)

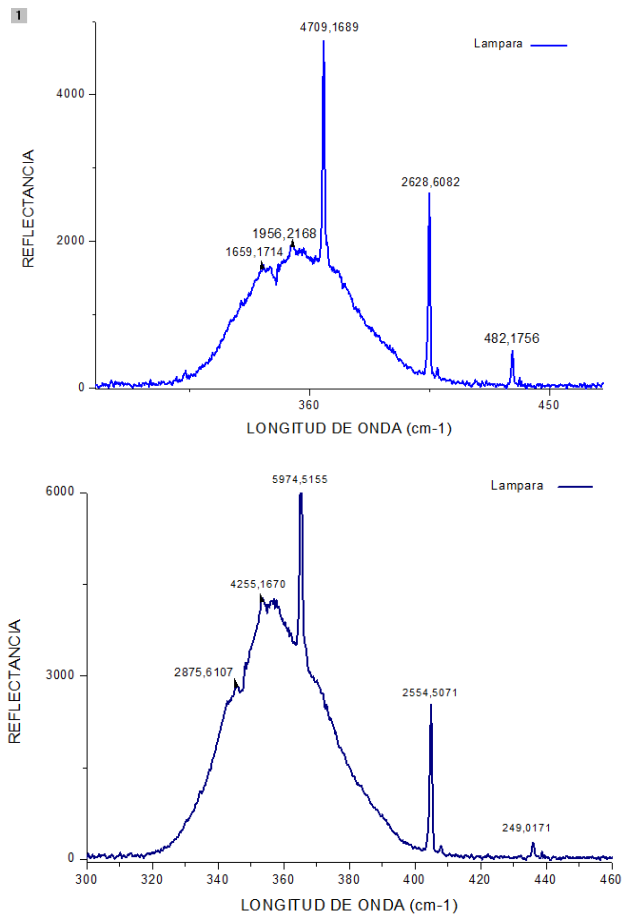
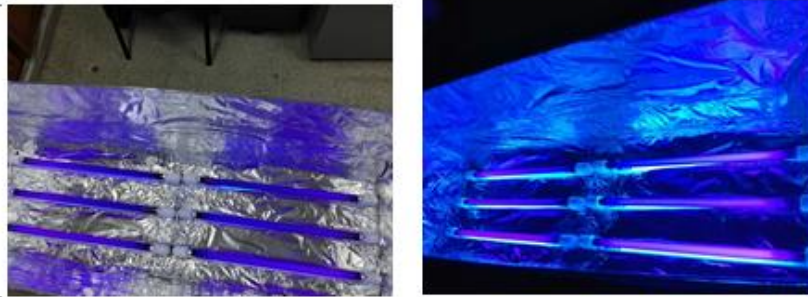


6. **Secado** de las 4 telas (3 horas a 100°C)



7. **Pesado**
(2 min de estabilización en la balanza por tela)

Anexo E. Cámara iluminada con lámparas UV, empleada para cubrir la pecera e irradiarla durante el proceso de recubrimiento por inmersión y caracterización de las lámparas*

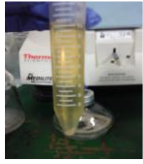


* Medición del espectro de dos lámparas de 20 watts cada una, mediante espectrómetro HR4000 de Ocean optics. Tiempo de integración: 200 ms, proceso real proceso realizado por Director LEAM – UIS CABANZO HERNÁNDEZ, Rafael.

Anexo F. Proceso microbiológico



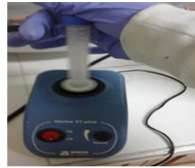
Figura F1. Proceso de activación de la bacteria



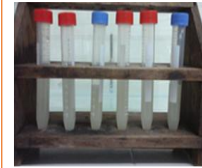
Se toma 132 ml de caldo y se reparten en 12 tubos de centrifuga, resto se conserva en la nevera



se llevan a la centrifuga (a 3100 rpm por 15 min)



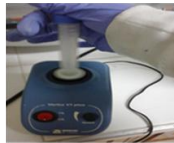
Se elimina el sobrenadante, se agrega solución salina y se lleva al vortex para homogenizar



las bacterias se concentran en 6 tubos con solución salina estéril



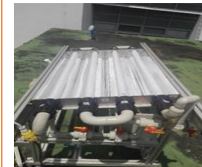
centrifugación (15min a 3100 rpm)



Se retira el sobrenadante, se agrega agua destilada y se homogeniza en el vortex



Se inoculan las bacterias en los 14 litros de agua destilada en el CPC



CPC puesto en funcionamiento con 4 telas funcionalizadas.



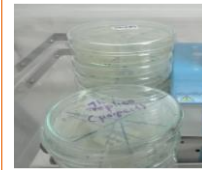
Toma de muestras



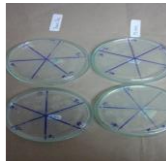
Dilución en serie



Sembrado de la muestra en agar de recuento



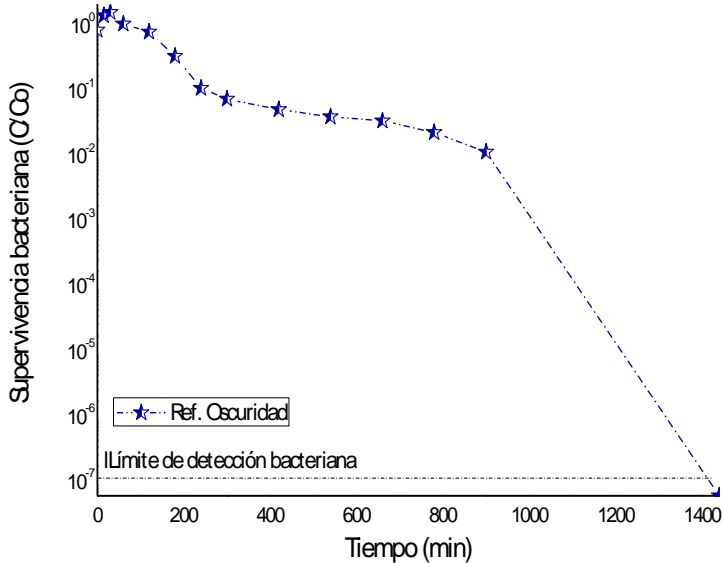
incubación



conteo en placa

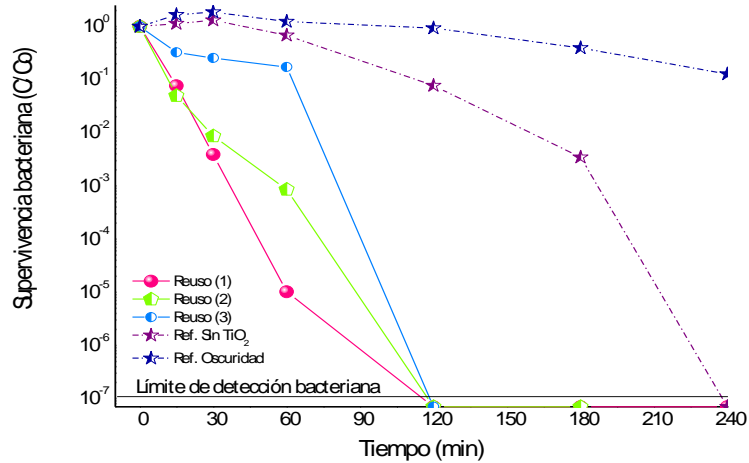
Figura F2. Preparación de la suspensión bacteriana, inoculación, toma de muestras, sembrado y conteo en placa

Anexo G. Curva de referencia a condiciones de oscuridad, sin algodón ni fuente de carbono

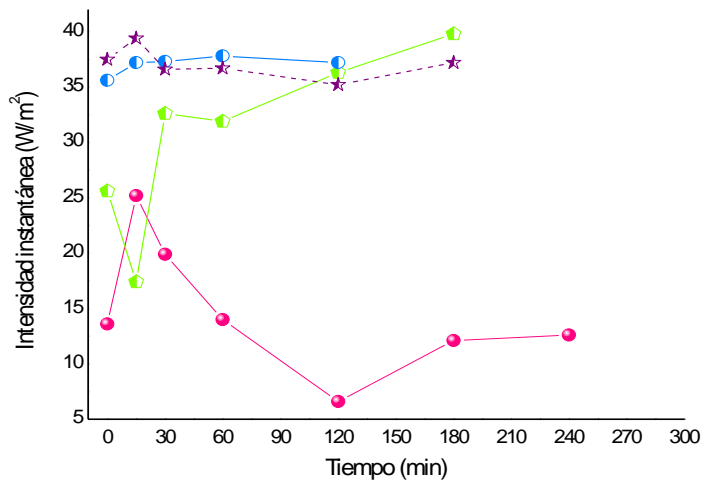


Anexos H. Actividad fotocatalítica de textiles modificados con TiO₂

Figura H1. a) Actividad fotocatalítica durante tres reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,4 [gTiO₂/L H₂O], en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m². b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo durante la reacción

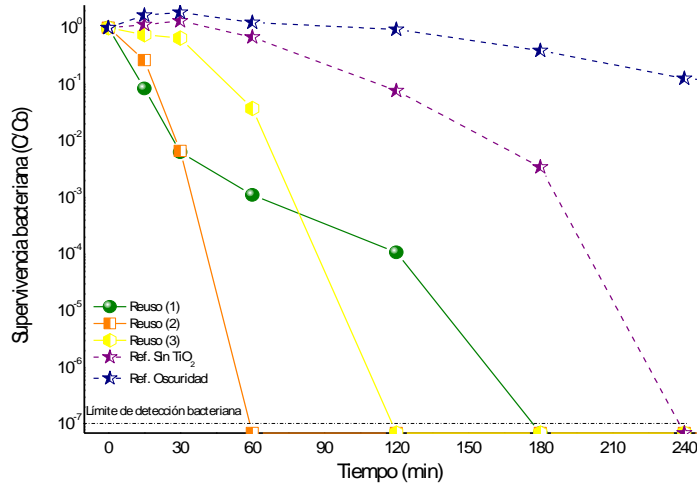


a)

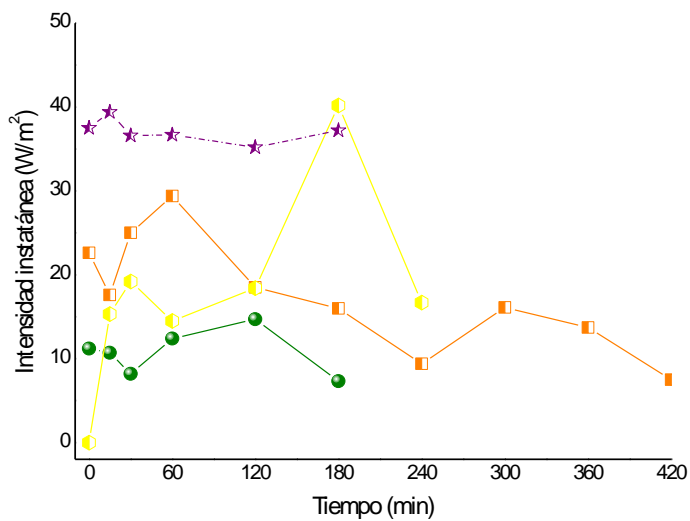


b)

Figura H2. a) Actividad fotocatalítica durante tres reúsos de los textiles modificados con una concentración de 0,8 [gTiO₂/L H₂O], en función del tiempo. Para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m². b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo durante la reacción

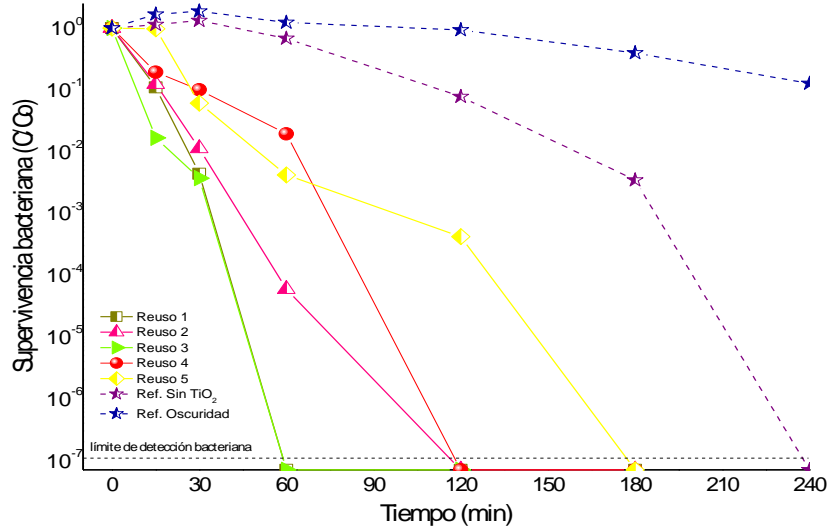


a)

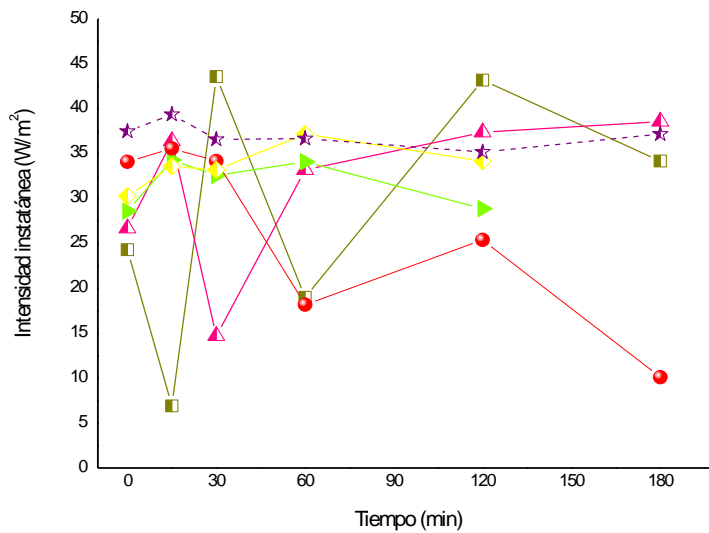


b)

Figura H3. a) Actividad fotocatalítica durante cinco reusos de los textiles modificados con una concentración de 0,8 [gTiO₂/L H₂O+ luz UV] en función del tiempo para una intensidad acumulada mayor o igual a 70W/m². b) Radiación UV instantánea respecto al tiempo dado durante la reacción)



a)



b)

Anexos I. Cálculos para el análisis de varianza

Modelo de efectos para la representación de los efectos de cada factor y sus interacciones sobre la variable de respuesta.

$$y_{ijk} = \mu_{ij} + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \text{ (Ec. 1)}$$
$$i = 1, 2, 3, \dots, a; j = 1, 2, 3, \dots, b; k = 1, 2, 3, \dots, n$$

En la ecuación 1, a y b son los niveles de los factores A Y B respectivamente; en este caso de estudio A Y B pertenecen a la concentración de catalizador en suspensión (CS) y fotoactivación (FA) del textil respectivamente, y es la variable de respuesta (número de reúsos), μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del nivel i-ésimo del factor A, β_j es efecto del nivel j-ésimo del factor B y $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre τ_i y β_j , por último ε_{ijk} es el efecto del error aleatorio. Se supone que ambos factores son fijos, y los efectos del tratamiento se definen como las desviaciones de la media global, por lo que $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ de manera similar para β_j y $(\tau\beta)_{ij}$. Teniendo en cuenta lo anterior se generan las siguientes hipótesis:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

Para los efectos del primer factor, en este caso la concentración,

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

$$H_1: \text{al menos una } \beta_j \neq 0$$

Para los efectos del segundo factor, la fotoactivación del textil

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$$

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

Para las interacciones de los efectos de los dos factores en la variable de respuesta.

Así si se rechaza la hipótesis nula de alguna de las anteriores expresiones es apreciable el efecto del factor correspondiente, si no se rechaza, su efecto es despreciable. Teniendo en cuenta esto, se muestran los datos en la tabla 1, donde los valores en rojo son los resultados obtenidos por cada réplica; la tabla 2, muestra los valores de las sumas de cuadrados necesarias para hacer el análisis de varianza

Tabla 11. Número de reúsos logrados por cada combinación de factores. CS: Concentración en suspensión; FA: Fotoactivación del textil

		FA			
		SIN		CON	
CS	0.8	3	3	4	4
		2	2	5	5
	0.4	3	3	7	7
		3	2	7	7

Tabla I2. Resultado de las sumas de cuadrados totales (SST), de cada uno de los factores (SS(CS) y SS(FA)), de la interacción entre factores (SS(CS-FA)) y del error (SSE)

SST=	54.44
SS(CS)=	7.563
SS(FA)	39.06
SS(CS-FA)	5.063
SSE	2.75

Anexos J. Análisis EDS para muestras de algodón

Figura J1. Muestra de algodón sin TiO_2

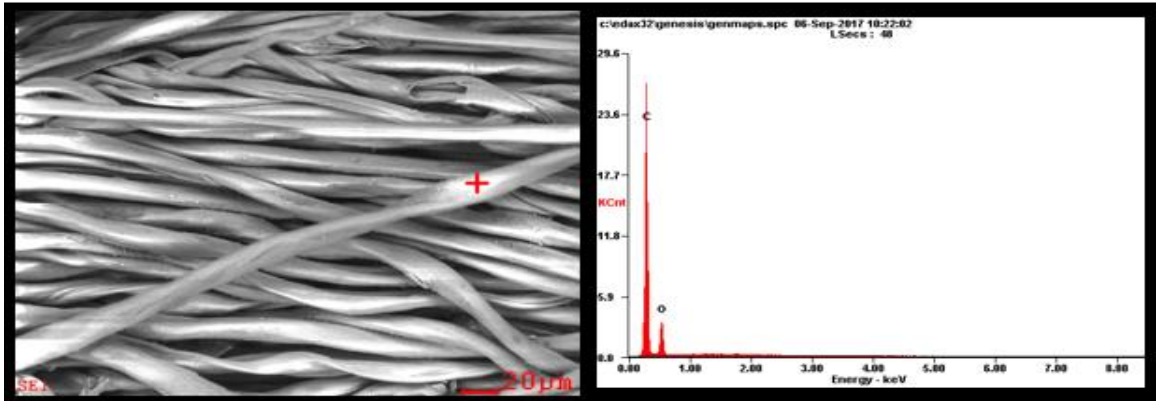


Figura J2. Muestra de algodón con TiO_2 sin reúso

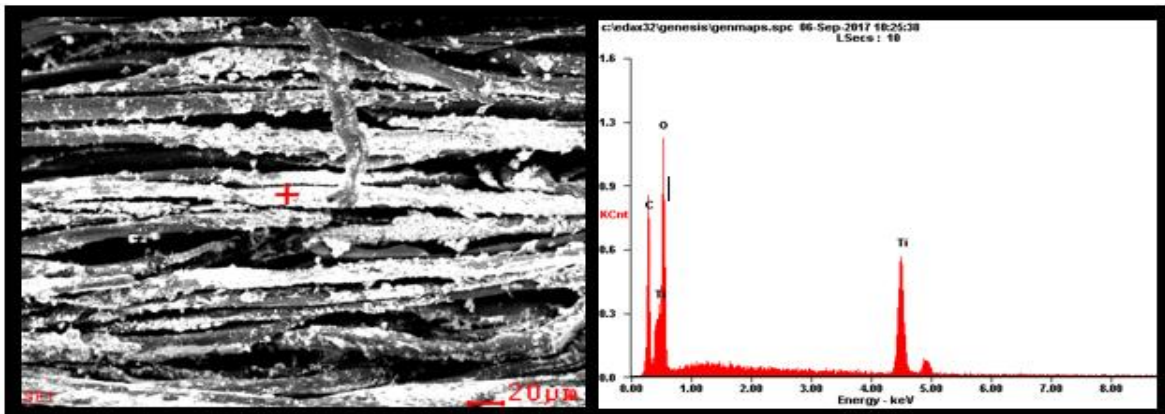


Figura J3. Muestra de algodón con TiO_2 después de 7 reúsos

