

PRODUCCIÓN *IN SITU* DE NANOCRISTALES DE TiO_2 SOBRE FIBRAS DE YUTE (*Corchorus capsularis*) CON POTENCIALIDAD EN MODA FUNCIONAL Y SOSTENIBLE

Angie Johanna Arismendi Lozano

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la sociedad se enfrenta al reto de lograr procesos y productos más sostenibles en un planeta cuyos recursos son limitados. La industria textil, de este modo se encuentra en una constante búsqueda en donde los materiales usados dentro de sus procesos sean: sostenibles, provenientes de fuentes renovables, que disminuyan la contaminación química y se alejen de la dependencia del petróleo. No obstante, el hecho que una materia prima sea renovable, no basta para garantizar la sostenibilidad del producto ya que la capacidad que tiene una materia para regenerarse rápidamente no dice nada sobre las condiciones de uso de energía, agua y químicos que se necesitan en el cultivo o en la fabricación, así como el impacto que tienen en el ecosistema y en los trabajadores (Fletcher, 2012). Por eso el reto para la industria textil es poder aprovechar las ventajas ambientales que las fibras naturales poseen y, a través de la nanotecnología convertirlas en fibras totalmente competitivas.

Por eso las fibras naturales como yute, sisal, algodón, lino, entre otras, exhiben atractivas propiedades mecánicas para su manufactura, bajo costo de adquisición y principal fuente biodegradable y renovable dentro de esta industria. De las ya mencionadas, el yute es una de las fibras más subutilizadas dentro de las materias primas provenientes de la agroindustria por su alta disposición y bajo costo de adquisición (Thomas et al, 2015).

La fibra de yute es comúnmente conocida como la "fibra dorada", que tradicionalmente es cultivada en países en desarrollo de Asia como Bangladesh, India y Tailandia como también en partes de América latina (FAO, 2004). De esta fibra, las especies más importantes son las *Corchorus Olitorius* y *Corchorus Capasularis*, que son utilizadas comúnmente para la elaboración de sacos, fondos de alfombras y otros revestimientos de suelos (Roul, 2009). Se puede cultivar en áreas bajas tropicales con una humedad y temperatura entre (60%- 90% y 60°F-100°F) respectivamente (Pooja, 2005) no necesita del uso de pesticidas o fertilizantes, logrando ser 100% ecológica, biodegradable, reciclable y con gran eficiencia de producción (Thomas et al, 2015).



Figura 1 Fibra de yute

El yute es extraído del tallo de la planta del mismo nombre, la cual es cortada, descortezada y por último desfibrada sin la necesidad de agentes químicos perjudiciales para el medio ambiente. Durante la maduración de cada hectárea cultivada con yute 15 toneladas de CO₂ son captadas y 11 toneladas son liberadas en forma de O₂. Otro aporte de esta fibra es su gran capacidad de restablecer suelos ya antes cultivados debido a su alto contenido de biomasa que es capaz de restablecer su humedad inicial (Müssing, 2010).

Por lo anterior, ésta fibra muestra que tiene el potencial que la industria textil requiere para disminuir los problemas de contaminación actuales generados debido al uso de fibras provenientes de derivados del petróleo, convirtiendo la industria textil en un mercado más sostenible y competitivo, el cual no solo bastará con suplir fines estéticos, sino será una herramienta funcional con un valor agregado que le impondrá la intervención de la nanotecnología en ella (Lee, Pricila, 2013).

Por otro lado, la nanotecnología se ha abierto campo en la industria textil, debido a que esta disciplina puede mejorar las propiedades de las fibras naturales ya existentes, además esta disciplina logra desarrollar nuevas tendencias a partir de propiedades totalmente desconocidas (Militky y Koemenáková, 2013). Por esto, en la actualidad se encuentran disponibles en el mercado textiles con características antimicrobianas para implementos de medicina y con características fotocatalíticas con un enfoque deportivo. Las aplicaciones de la nanotecnología más relevantes son: el uso de nanopartículas de óxido de zinc con propiedades que protegen contra la radiación ultravioleta, textiles hidrofóbicos con nanopartículas de sílice (Moghe, A.K & Gupta, B.S. 2008), propiedades antibacterianas en algodón por medio de nanopartículas de plata y propiedades como degradante de colorantes en fique por medio de nanopartículas de óxido de hierro (Ortiz et al., 2014). En la presente investigación y teniendo en cuenta que la fibra de yute tiene un contenido de celulosa entre (60% - 70%), se emplearán ácidos dicarboxílicos como *spacers* que mediante enlaces químicos unen los grupos hidroxilo libres de la celulosa con las nanopartículas de TiO₂, las cuales tienen capacidad fotocatalítica para la degradación de agentes orgánicos (Vargas et al., 2011).

Por tanto, este proyecto tuvo como objetivo general la nanoestructuración de la fibra de yute (*Corchorus capsularis*) con nanopartículas de TiO₂ como fibra potencial para la industria textil. Para dar cumplimiento a este, se realizó una caracterización física, química y mecánica de la fibra de yute para realizar posteriormente, una síntesis in situ de nanopartículas de dióxido de titanio mediante y finalmente, una comprobación de las propiedades fotocatalíticas de la fibra nanoestructurada. Finalmente, la fibra nanoestructurada fue tejida con algodón orgánico para obtener una pieza textil que fue diseñada y confeccionada para obtener prendas *prêt-à-porter*.

Abreviaturas:

SH: Ácido succínico con NaPO₂H₂;
SD: Ácido succínico con Na₂HPO₄
CH: Ácido cítrico con NaPO₂H₂
CD: Ácido cítrico con Na₂HPO₄

MH: Ácido Málico con NaPO₂H₂
MD: Ácido Málico con Na₂HPO₄
TH: Ácido Tartárico con NaPO₂H₂
TD: Ácido Tartárico con Na₂HPO

2 METODOLOGÍA

Este trabajo empleó fibra de yute comercial, la cual se caracterizó físicamente con el fin de documentar sus propiedades iniciales; diámetro de la fibra, densidad aparente, porcentaje de humedad, porcentaje de absorción, color, morfología, grupos funcionales, resistencia de tracción, tensión, elongación y cuantificación de lignina. Además, se realizó una comparación de las propiedades adquiridas luego de la nanoestructuración, en donde se evaluó la actividad antimicrobiana y fotocatalítica.

2.1 Caracterización de la fibra

2.1.1 Diámetro de la fibra.

En la determinación del diámetro de la fibra se usó el micrómetro digital Mitutoyo MIT 500-197-20B, donde se utilizó una fibra de la tela de yute con un numero de réplicas igual a cinco.

2.1.2 Densidad aparente.

La densidad aparente de la fibra se calculó mediante el método de desplazamiento de volumen (Moreno et al., 2007), en el cual se tiene en cuenta el peso de la fibra y el volumen desplazado. Para las mediciones se tomaron 5 g de fibra, para observar y cuantificar la variación del volumen del agua en la probeta de 100 mL inmediatamente realizada la inmersión, se realizaron por triplicado siguiendo la Ecuación 1.

$$\delta = \frac{m}{v_d} \quad (1)$$

Donde δ es la densidad aparente, m es la masa de fibra y v_d es el volumen desplazado.

2.1.3 Porcentaje de humedad

Se determinó la humedad de la fibra con el equipo Moisture Analyzer HB43-S, con muestras de 0.5 g por triplicado siguiendo el procedimiento descrito en el manual del equipo (Mettler-Toledo, 2011).

2.1.4 Cuantificación de lignina Klason

La determinación del contenido de lignina (Klason, que es lignina ácido) se realizó según norma TAPPI 222 os-74 (Technical Association for the Pulp and Paper Industries, 1978), utilizando 1 g de material anhidro libre de extractos se le agregaron 15 mL de H_2SO_4 al 72% que se mantuvo en agitación a baño maría entre 20 ± 1 °C, luego es transferido a un matraz con H_2O destilada (500-400 mL), se lavó y se diluye con H_2O hasta alcanzar una concentración de H_2SO_4 del 3% y un volumen de 575 mL. Posteriormente, se llevó a ebullición en reflujo durante 4 h, la solución se decanta manteniendo el matraz en una posición inclinada hasta que el material sólido fuera separado. Posteriormente, se filtró a

través de un crisol Gooch de porosidad fina, el cual se lavó con agua caliente y se secó a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. El porcentaje de lignina se determinó por triplicado según la ecuación 3 (Verónica et al., 2009).

$$\% \text{ Lignina} = \frac{w \text{ Lignina}}{w \text{ Anhidro de la muestra}} * 100\% \quad (3)$$

2.1.5 Propiedades mecánicas

Los valores de resistencia de tracción, tensión y elongación se obtuvieron por medio de una máquina universal Jinan Testing Equipment IE Corporation siguiendo la norma ASTM D3822-07 con 5 réplicas (ASTM, 1996).

2.1.6 Espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Los grupos funcionales presentes en la fibra de yute natural y nanoestructurado se identificaron mediante el uso de la técnica de espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR*), empleando un equipo marca Prestige-21 Shimadzu dentro del intervalo de 400cm^{-1} a 3800cm^{-1} , esta técnica proporcionó un espectro del cual se pueden identificar los grupos funcionales principales de la fibra antes y después de la experimentación, en donde cada absorción identificable corresponde a una vibración determinada de algún enlace dentro de la molécula (Rojo, 2006).

2.1.7 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La morfología del material o caracterización superficial fue realizada por medio del microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscope, SEM*) empleando un equipo JEOL JSM-6490LV. Las muestras requirieron de una metalización previa con oro para su análisis.

2.2 Nanoestructuración de la fibra

Esta investigación se hace bajo la inclusión de un ácido como *spacer* (Meilert et al., 2005), el cual debe contar con al menos dos grupos carboxílicos que puedan formar un enlace con la fibra y otro con el TiO_2 por literatura el ácido succínico y los ácidos tartárico, cítrico y málico son propuestos ya que cumplen con dichos grupos funcionales. Figura 1 que podrían emplearse en los enlaces covalentes con el TiO_2 .

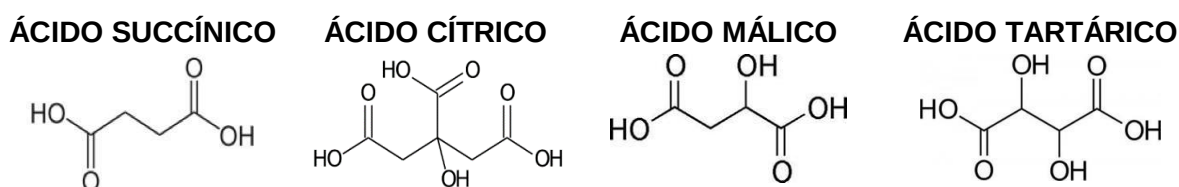


Figura 2 Estructura química de ácidos dicarboxílicos usados en la nanoestructuración.

Debido a que la reacción es de tipo ácido-anhidro (Fernández, 2015) se utilizaron catalizadores (hipofosfito de sodio y fosfato disódico) (Roshan, 2014), por lo cual se realizaron 8 corridas donde se emplearon 4 tipos de ácidos carboxílicos (Figura 2) y dos catalizadores o promotores de la reacción entre la celulosa y los ácidos mencionados (Tabla 1).

Tabla 1 Reactivos empleados en la adición de ácidos carboxílicos a la celulosa de la fibra de yute

# Ensayo	Ácido	Catalizador
1	Ácido succínico	Hipofosfito de sodio
2	Ácido succínico	Fosfato disódico
3	Ácido cítrico	Hipofosfito de sodio
4	Ácido cítrico	Fosfato disódico
5	Ácido málico	Hipofosfito de sodio
6	Ácido málico	Fosfato disódico
7	Ácido tartárico	Hipofosfito de sodio
8	Ácido tartárico	Fosfato disódico

Para la unión del ácido a la fibra, el yute se sumergió en una solución acuosa de ácido (6%, w/w) en presencia del catalizador al (4% w/w) durante 1 h. Después, se secó por 3 min a 80 °C y posteriormente 2 min a 115 °C. Una solución de TiO₂ (5 g/L de TiO₂ P25 Degussa) fue ultrasonificada durante 30 min y posteriormente, sumergida en la solución de TiO₂ y calentada durante 1 h a 75 °C. Finalmente, se dejó secar por 1h a 100°C (Meilert K., 2005).

2.3 Evaluación de actividad antimicrobiana

Un pedazo de tela de yute nanoestructurada de 4 x 4 fibras fue esterilizado en una cámara equipada con una lámpara de luz UV de 15 W durante 30 min. La muestra fue colocada sobre un cultivo de *Escherichia coli* en una placa de Petri con medio MacConkey. El agar fue dividido en cuatro partes iguales, una parte para el blanco (yute no nanoestructurado) y tres de estas para la fibra nanoestructurada, manteniendo el modelo experimental de la Tabla 1. Las placas mantenidas a 34°C y, luego de 24 h se realizó el conteo de colonias y con su respectivo porcentaje de reducción de bacterias (Kale y Meena, 2012), siguiendo la Ecuación 4 por triplicado.

$$R = \frac{B-A}{B} * 100 \quad (4)$$

Donde, R: porcentaje de reducción de bacterias, A: CFU de las muestras nanoestructuradas y B: CFU de las muestras blanco.

2.4 Evaluación de actividad fotocatalítica

Para evaluar la actividad fotocatalítica se realizaron muestras de tela de yute de 2.5 cm de diámetro siendo teñidas con vino tinto tipo Cabernet y Henna Hindú de color negro mediante inmersión. A seguir, las muestras fueron colocadas bajo luz UV de 6 W durante 42 h (Figura 3).

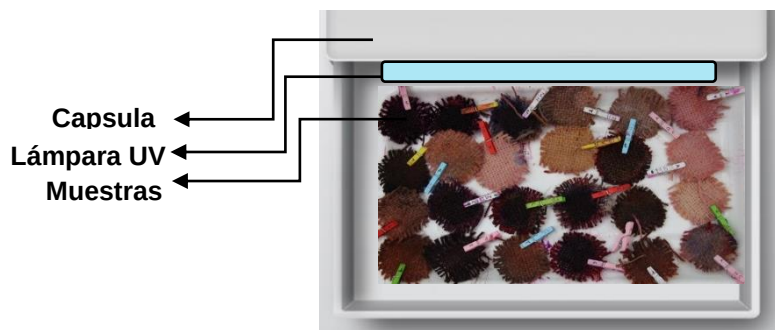


Figura 3. Montaje de irradiación UV para evaluación de degradación de color de las muestras nanoestructuradas.

Para el análisis de color se empleó el equipo CR-400 Konica Minolta realizando mediciones directas de las cuales se extrajeron las coordenadas de color (L , a^* y b^*) correspondientes a cada etapa de experimentación con el fin de cuantificar y evaluar dicho cambio (ΔE) siguiendo la Ecuación 5 (Campus et al., 1999).

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_0)^2 + (a^*_1 - a^*_0)^2 + (b^*_1 - b^*_0)^2} \quad (5)$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización

Se observó que los resultados de las determinaciones de porcentajes de humedad y absorción de humedad, diámetro de fibra, densidad aparente y porcentaje lignina Klason obtenidos son comparables a los reportados por la literatura (Tabla 2).

Tabla 2 Comparación datos de caracterización obtenidos con los reportados por la literatura

Ensayo	Yute natural	Otros autores	Referencia
% Humedad	10.50	12.5	(Ordoñez y Sánchez, 2013)
Diámetro de fibra	20 (μm)	17 – 20 (μm)	(Alvarez et al., 2006)
Densidad aparente	1.35 (g/cm^3)	1.37 (g/cm^3)	(Deng et al., 1999)
%Lignina Klason	13	13.8	(Alvarez et al., 2006)

3.1.1 Ensayos mecánicos

Se realizó una representación gráfica de esfuerzo vs. deformación para cada catalizador con los diferentes ácidos como se muestra en las Figuras 4 y 5 en donde se logró observar el cambio respecto al catalizador y ácido empleado en la nanoestructuración de la fibra, a una velocidad constante de 2 mm/min, los resultados son reportados en la Tabla 3.

Tabla 3 Propiedades mecánicas para yute natural y yute nanoestructurado a condiciones estándar.

	Tensión Máxima (MPa)			% Elongación Máximo		
CD	90.126	±	0.183	4.066	±	0.083
CH	97.251	±	0.261	4.536	±	0.091
MD	96.940	±	0.182	4.086	±	0.046
MH	107.394	±	0.082	4.018	±	0.078
TD	81.251	±	0.139	4.391	±	0.064
TH	103.503	±	0.138	3.941	±	0.083
SD	68.442	±	0.097	3.572	±	0.108
SH	88.628	±	0.184	3.756	±	0.092
Natural	184.070	±	0.095	4.081	±	0.103

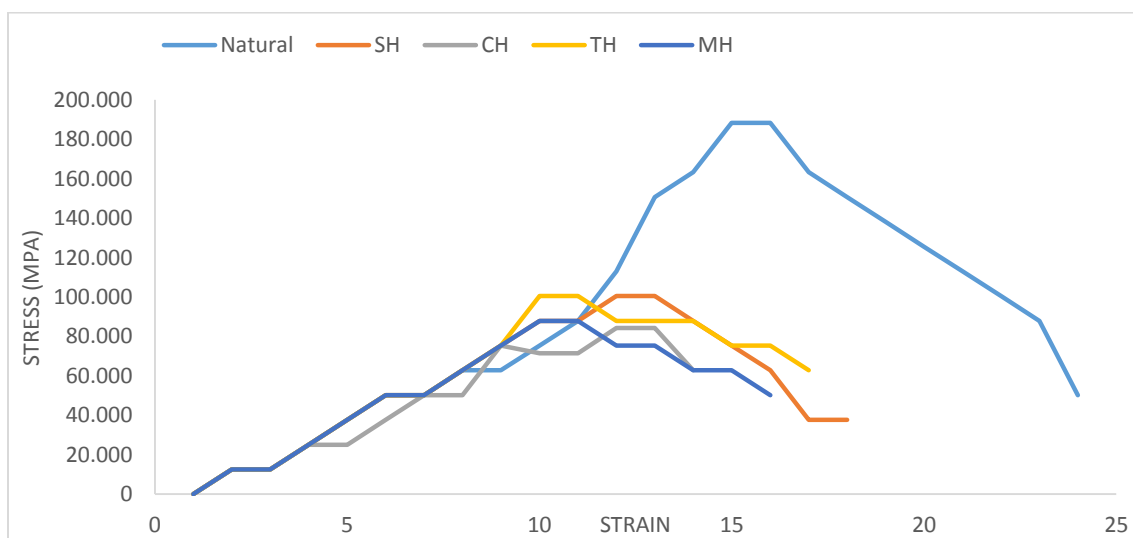


Figura 4 Comportamiento de Esfuerzo vs Elongación de muestras de yute natural y con hipofosfito de sodio (H) en presencia de varios ácidos. S: ácido succínico, C: ácido cítrico, T: ácido tartárico, M: ácido málico

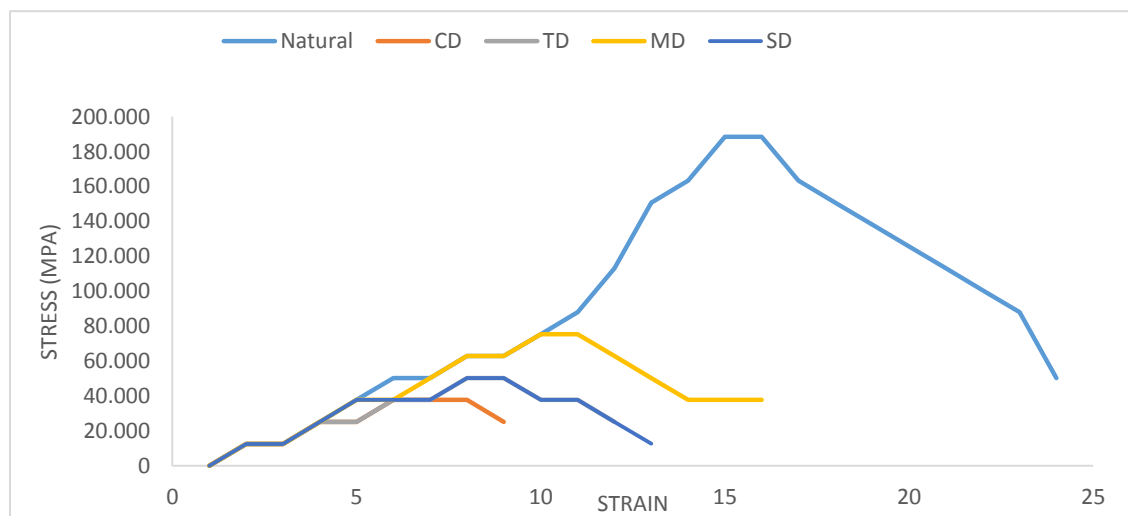


Figura 5 Comportamiento de Esfuerzo vs Elongación de muestras de yute natural y con Fosfato disódico (D) en presencia de varios ácidos. S: ácido succínico, C: ácido cítrico, T: ácido tartárico, M: ácido málico

Se logró observar que el esfuerzo máximo de tracción y elasticidad en cada una de las fibras de yute nanoestructuradas disminuye; además, con la utilización del ácido málico como medio enlazante se logró que el esfuerzo de tracción tuviese una menor disminución en su punto de ruptura respecto a los demás ácidos y más no a los catalizadores. Esto es debido a que el ácido málico es conocido por su capacidad de aumentar la energía y la tolerancia al ejercicio (Bonilla et al., 2013), por ende, tiene una mayor resistencia a la ruptura, elasticidad y esfuerzo máximo de tracción comparado con las demás fibras nanoestructuradas.

En el caso de la resistencia de ruptura se ve afectada por las altas temperaturas a las cuales fueron expuestas durante la nanoestructuración, donde el choque térmico debilitó la estructura interna de la fibra (Bonilla et al., 2013).

3.1.2 Espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Se analizaron los grupos funcionales de la fibra en estado natural y nanoestructurada, según el catalizador como se muestra en la Figura 6. La banda localizada en la región de 3337 cm^{-1} se asocia al grupo funcional OH representativo del agua remanente en la fibra, la región de 1729 cm^{-1} se atribuye al grupo C=O correspondiente principalmente a la hemicelulosa la cual es un heteropolisacarido compuesto por unidades de xilosa, maltosa, galactosa y glucosa unidas por medio de enlaces éster (Rodríguez I., 2006). Además, esta región es representativa de los enlaces éster formados entre la fibra y el ácido, su incremento de la intensidad de este pico representa la sustitución de algunos grupos hidroxilo por los grupos acetilo, esto debido al tratamiento realizado para realizar la nanoestructuración con TiO_2 (Corrales et al., 2007). Para la región de los 1639 cm^{-1} se observa una reducción en la intensidad de este espectro, esto podría deberse a las vibraciones de los grupos aromáticos que pueden ser atribuidos a la lignina de las fibras de yute. Finalmente, el espectro 1422 cm^{-1} se asocia a grupos C-O-C y C-H que son generalmente atribuidos a la celulosa (William y Smith, 2006).

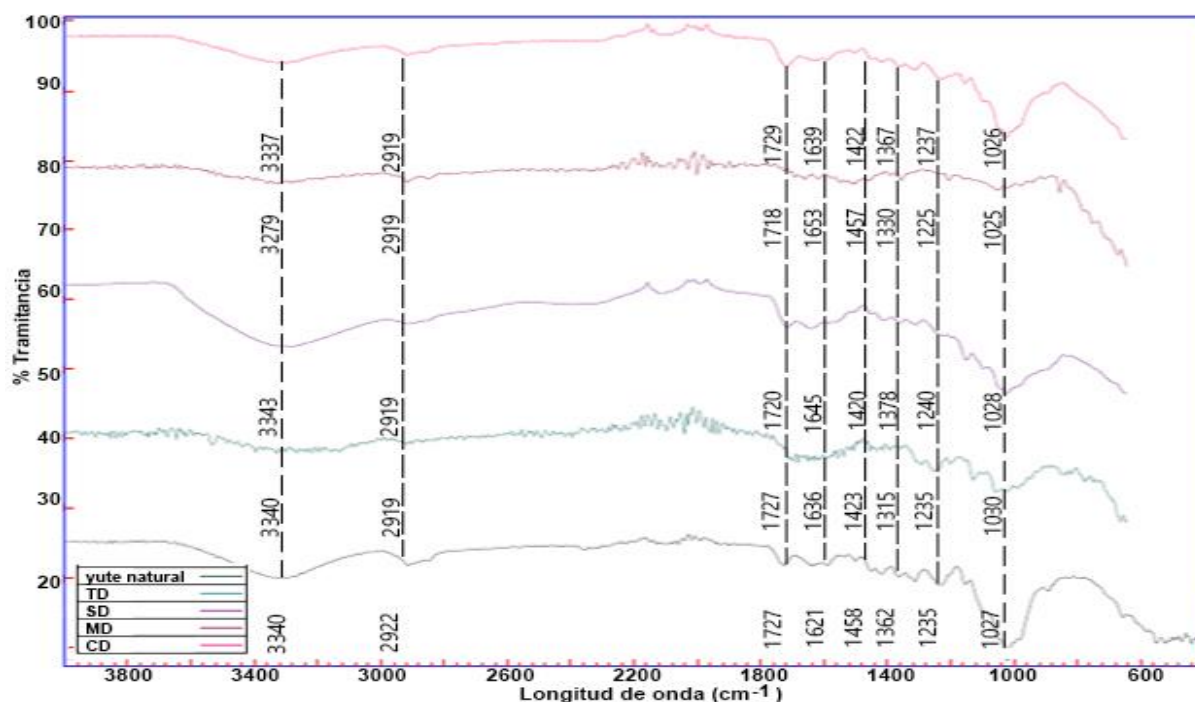


Figura 6 Resultados FTIR para muestras de yute natural y material nanoestructurado en presencia de varios ácidos. S: ácido succínico, C: ácido cítrico, T: ácido tartárico, M: ácido málico con fosfato disódico.

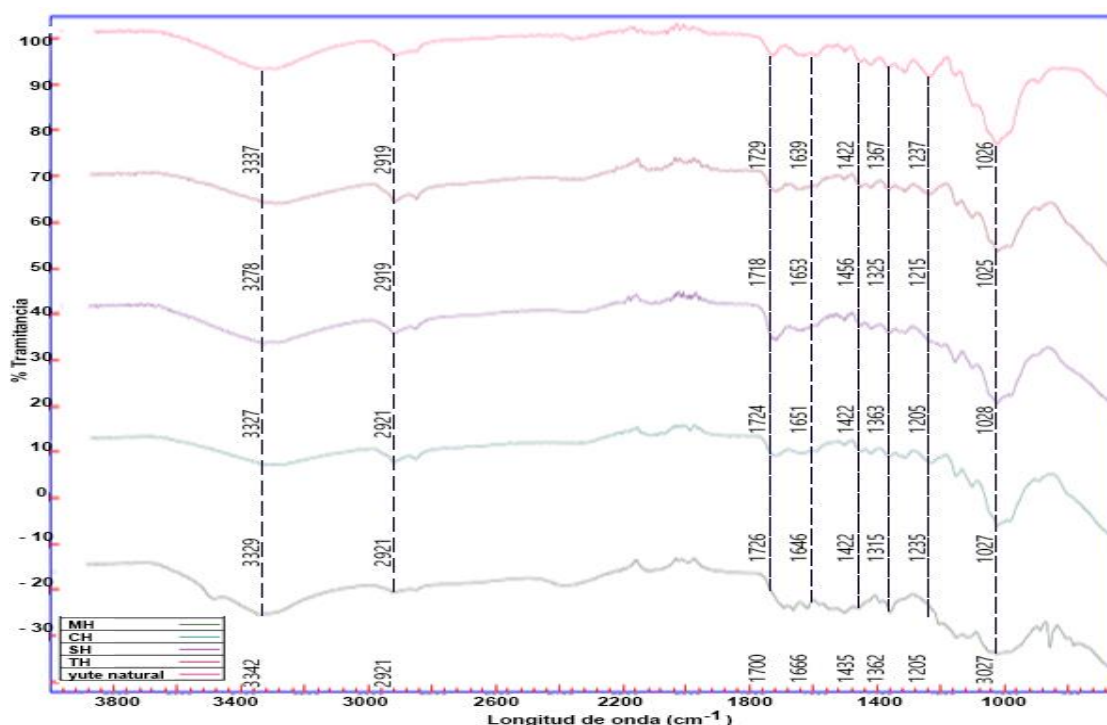


Figura 7 Resultados FTIR para muestras de yute natural y material nanoestructurado en presencia de varios ácidos. S: ácido succínico, C: ácido cítrico, T: ácido tartárico, M: ácido málico con hiposfosfito disodico.

3.1.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La Figura 8 muestra una fibra de yute con una estructura lisa y compacta característica de las fibras herbáceas fibrosas (Rodríguez, 2006). Al momento de ser nanoestructurada cambia drásticamente y se puede observar en las micrografías de la Tabla 5 donde se evidencio la adhesión de los cristales de TiO_2 interconectados en la superficie de la fibra con todos los ácidos y catalizadores escogidos con tamaños característicos para cada ensayo; además, con las micrografías tomadas con un aumento de X1400 se logra observar como la implementación de fosfato disodico lleva a cabo mejor la reacción , logrando mayor disposición de TiO_2 en la superficie de la fibra ya nanoestructurada.

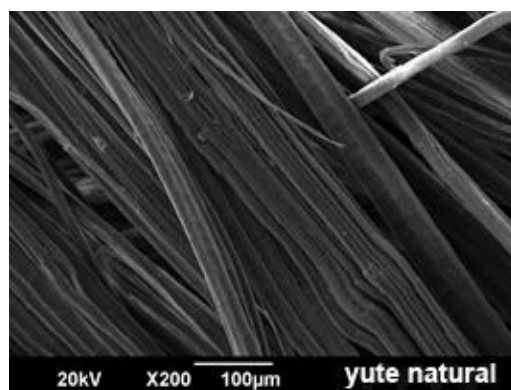
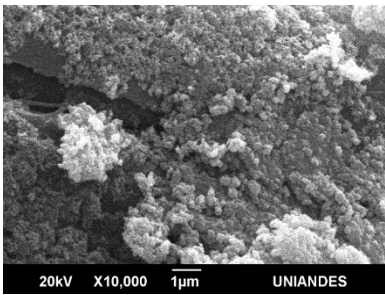
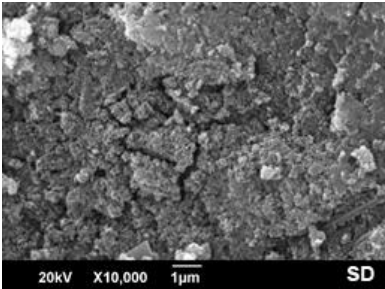
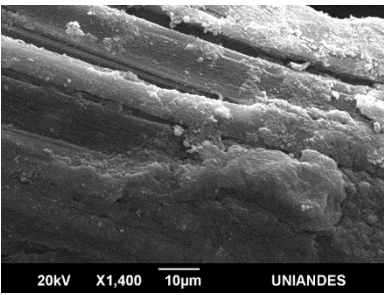
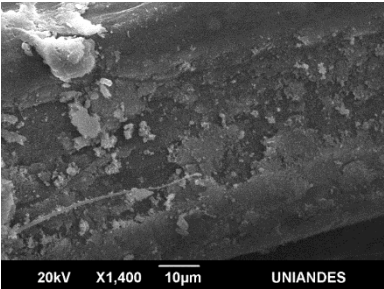
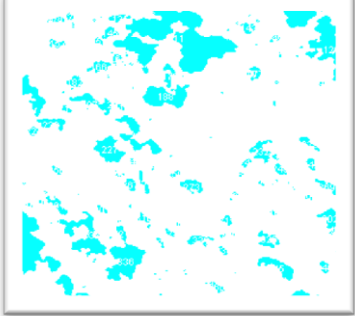
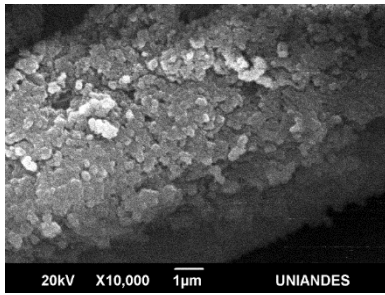
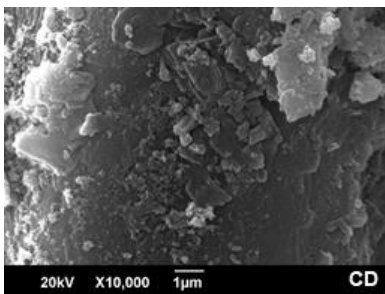
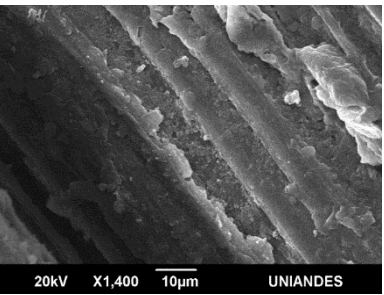
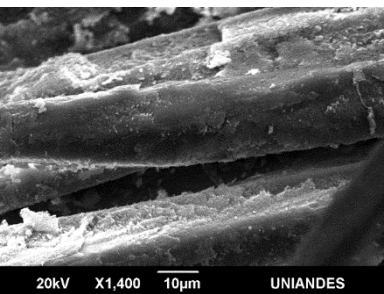
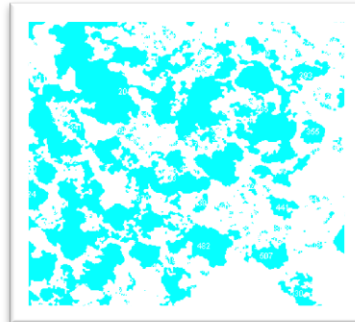
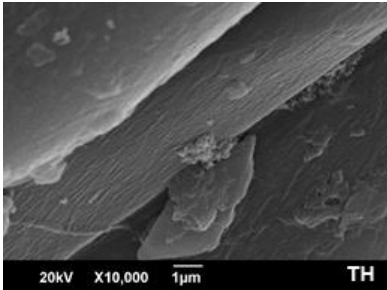
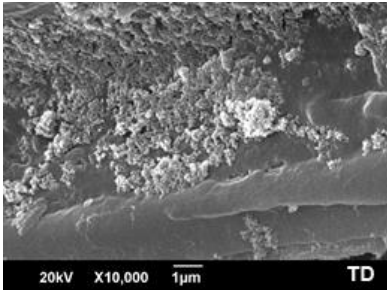
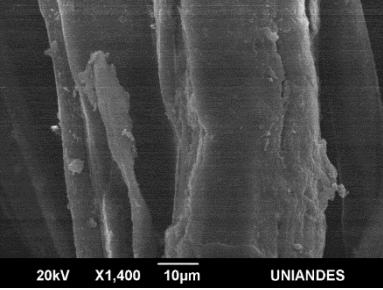
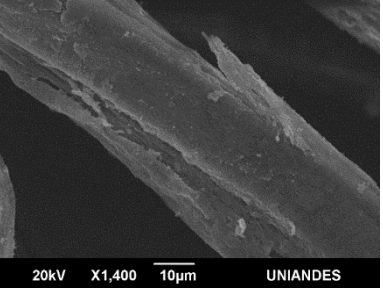
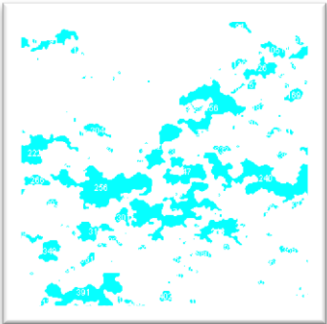
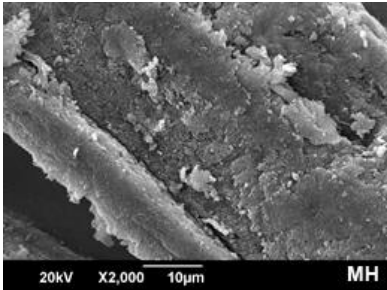
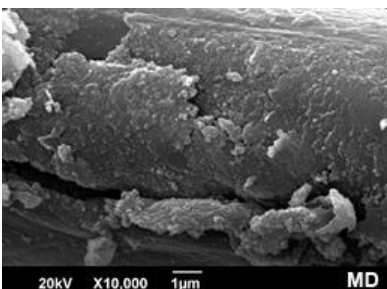
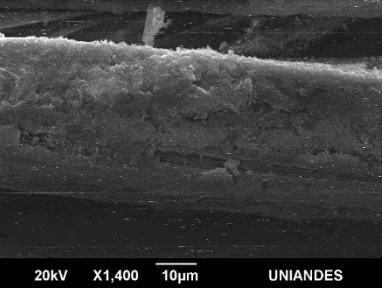
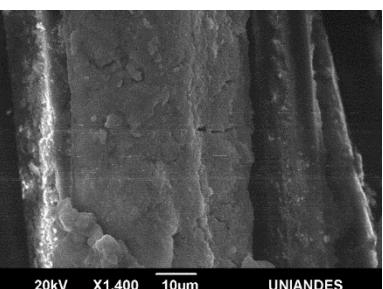
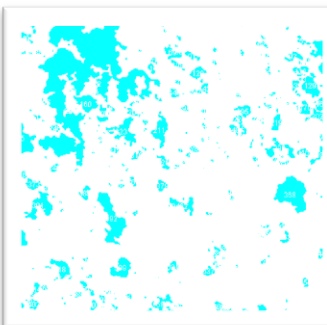


Figura 8 Micrografía SEM para Yute natural

Tabla 5 Micrografías SEM en presencia de varios ácidos. S: ácido succínico, C: ácido cítrico, T: ácido tartárico, M: ácido málico y catalizadores. H: hipofosfito de sodio y D fosfato disódico

	1 μm	10 μm	Distribution de partículas
Ácido Succinic	 	 	 *Ambos catalizadores lograron la deposición de cristales de TiO_2, logrando la formación de clústeres. *El tamaño de los cristales varía entre 100-250 nm.
Ácido Cítrico	 	 	 *Ambos catalizadores lograron la deposición de cristales de TiO_2, logrando la formación de clústeres. *El tamaño de los cristales varía entre 150-500 nm. *Se logra una mayor adhesión de TiO_2 comparado con el ensayo de ácido succínico.

Ácido Tartárico	 	 	 *Ambos catalizadores lograron la deposición de cristales de TiO_2 pero no es homogénea y solo en algunas zonas de la superficie de la fibra logrando la formación de clústeres menor. *El tamaño de los cristales varía entre 100-200 nm.
Ácido Málico	 	 	 *Ambos catalizadores lograron la deposición de cristales de TiO_2 y de forma homogénea. *Formación de clústeres. *El tamaño de los cristales varía entre 175-500 nm sin tener encuenta los clústeres.

3.2 Evaluación de actividad antimicrobiana

En la Figura 9 se puede observar la disminución en el crecimiento de colonias de *Escherichia coli* para cada muestra nanoestructurada analizada, obteniéndose los mejores resultados para la inhibición de colonias en el ensayo CD (Tabla 6, fila gris) y CH, lo cual se obtuvo luego de hacer el conteo de colonias respectivo (Tabla 6), este conteo se realizó para un diámetro de 3 ± 0.5 cm.

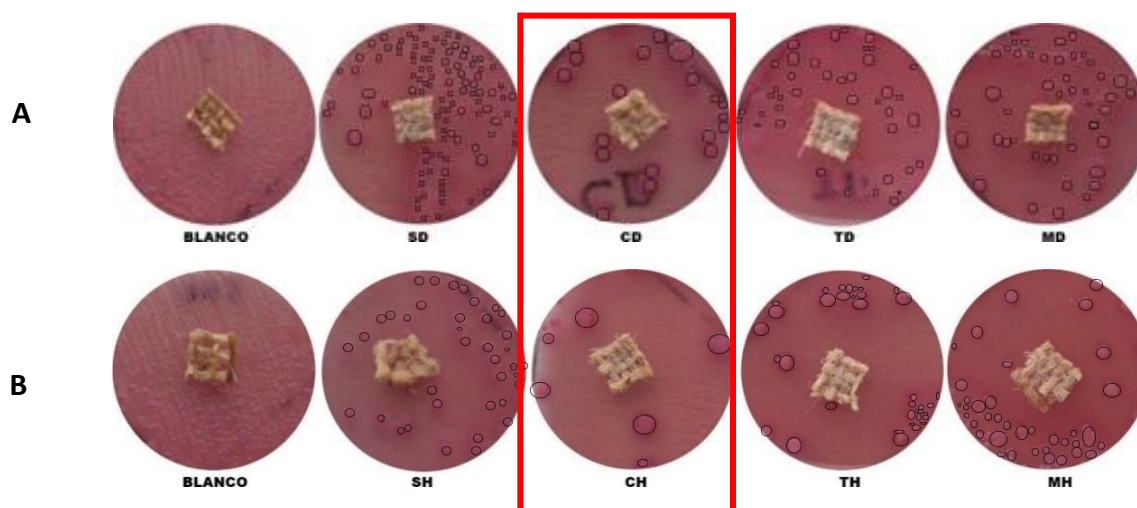


Figura 9 Cultivo en agar McConkey de las muestras nanoestructuradas y blanco sin nanoestructurar. A. Fosfito disódico y B. Con Hipofosfito de sodio

Tabla 6 Número de colonias para las muestras nanoestructuradas con los diferentes catalizadores y porcentaje de reducción

Ensayo	Numero de Colonias	% reducción de Colonias	Ensayo	Numero de Colonias	% reducción de Colonias
Blanco	336	-	Blanco	428	-
SH	38	88,69	SD	105	75,47
CH	6	98,21	CD	19	95,56
TH	39	88,39	TD	40	90,65
MH	40	88,09	MD	43	89,95

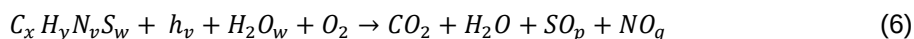
Aunque el objetivo principal de esta investigación no es el obtener una fibra con actividad antimicrobiana, este ensayo logró mostrar una propiedad adicional y de interés en la industria textil, ya que da sustento al objetivo de la producción de una fibra con propiedades de auto-limpieza.

3.3 Actividad Fotocatalítica

Los posibles mecanismos en la actividad fotocatalítica se muestran en la Figura 10 para las diferentes rutas de degradación donde el fotocatalizador absorbe la energía y procede a la reacción de degradación mostrada en la Ecuación 6 y en las figuras 11 y 12.

El primer mecanismo se lleva a cabo con la absorción de radiación de luz solar. Este esquema es para la decoloración de pigmentos orgánicos mediante el catión intermedio que logra realizar la deslocalización de un electrón que es promovido a la banda de conducción de la partícula de titanio en la cual con la presencia de oxígeno se procede a una reducción y posterior decoloración (Bozzi et al., 2005).

El segundo mecanismo es activado por la irradiación UV, en el cual por medio de la absorción de luz UV se logra una excitación de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción del TiO_2 , generando pares de electrón-hueco que pueden tomar la vía "A" cuando la superficie dona un electrón directamente a un aceptor de electrones para provocar una reducción, por otro lado, los electrones pueden ser donados al oxígeno adsorbido que se refiere la vía "B" de la superficie que resulta en la formación de radicales super óxido que reaccionan con la superficie de H^+ para producir radicales peróxidos. El agujero puede generarse ya sea vía "C" o vía "D" y cuando un agujero reacciona con el agua adsorbida de la superficie produce un radical hidroxilo o tomar la vía de "D" que se produce debido a la aceptación de electrón de una especie donante. Los radicales hidroxilos y los radicales peróxidos son los responsables de la descomposición fotocatalítica de las manchas orgánicas y colorantes (Bozzi et al., 2005).



Los resultados de la actividad fotocatalítica en la eliminación de manchas generadas por la tinción en la tela de yute se muestra en las Figuras 10 y 11, donde por medio de fotografías y coordenadas de color se logró extraer el color solido correspondiente a la muestra y tiempo determinado; todas las muestras teñidas mostraron actividad fotocatalítica ya que visualmente es evidente el cambio de coloración durante las 42 horas de irradiación UV. En el caso de los ensayos CD, CH, SD y SH se logró la remoción por completo del vino y tintura.

TINTURA (Henna Hindú)	
ÁCIDO SUCCÍNICO <chem>OC(=O)CCC(=O)O</chem>	FOSFATO DISODICO
	HIPOFOSFITO DE SODIO
ÁCIDO CÍTRICO <chem>OC(=O)C(O)C(=O)O</chem>	FOSFATO DISODICO
	HIPOFOSFITO DE SODIO
ACIDO TARTARICO <chem>OC(=O)C(O)C(O)C(=O)O</chem>	FOSFATO DISODICO
	HIPOFOSFITO DE SODIO
ACIDO MALICO <chem>OC(=O)C(O)C(=O)O</chem>	FOSFATO DISODICO
	HIPOFOSFITO DE SODIO

Figura 10 Degradación de Color durante 42 horas, muestras teñidas con Henna Hindú expuestas a irradiación UV

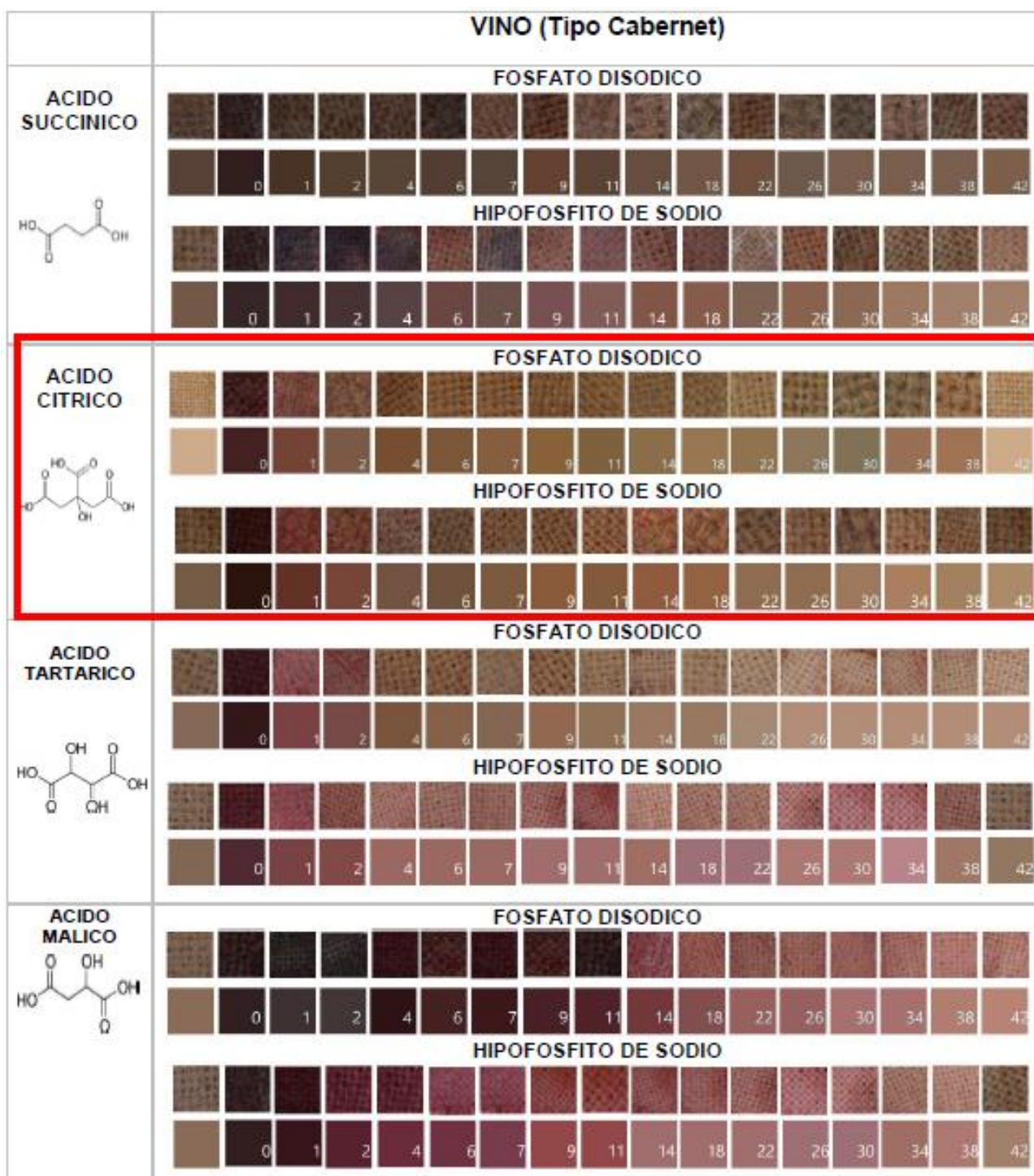


Figura 11 Degradación de Color durante 42 horas, muestras teñidas con Vino tipo Cabernet expuestas a irradiación UV.

Una forma cuantitativa de evaluar el cambio de color fue aplicando la Ecuación 5 representada en las Figuras 12 y 13, donde se logró observar el comportamiento ascendente del ΔE a través del tiempo para cada uno de los ensayos.

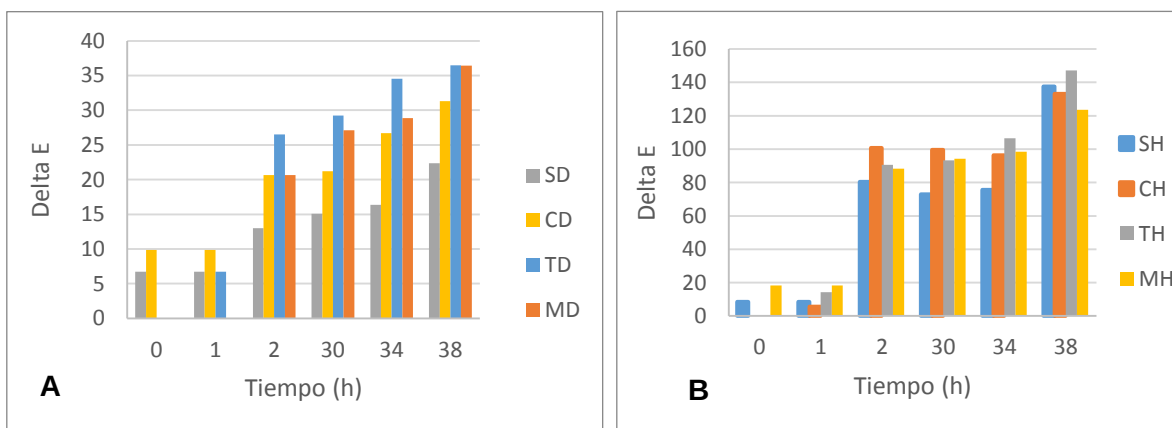


Figura 12 Cambio de Coloración (ΔE) para muestras teñidas con Henna Hindú durante las 42 horas de irradiación UV. A) Fosfato Disódico, B) Hipofosfito de Sodio

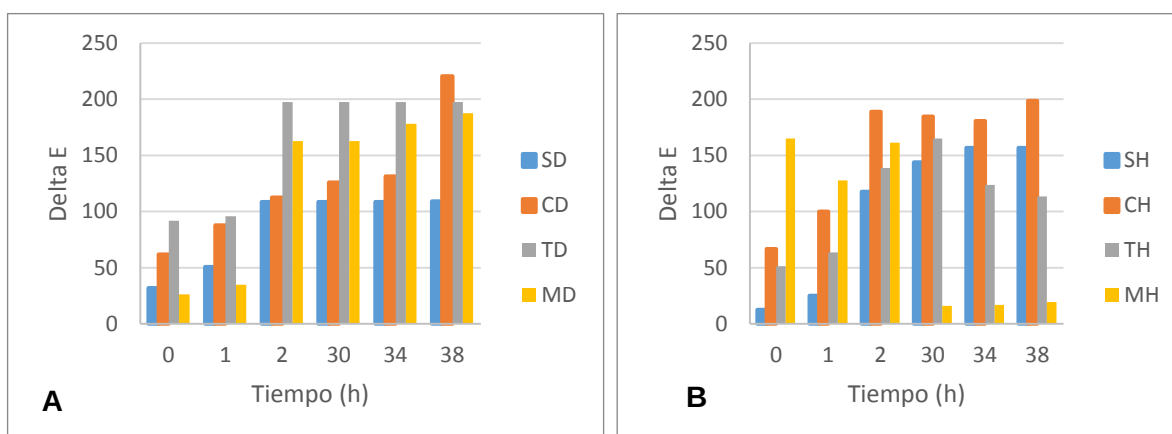


Figura 13 Cambio de Coloración (ΔE) para muestras teñidas con Vino tipo Cabernet durante las 42 horas de irradiación UV. A) Fosfato Disódico, B) Hipofosfito de Sodio

En las Figuras 12 y 13 el ΔE en los ensayos CD, CH, SD y SH comprueban que son mayores respecto a los demás ensayos, lo cual ratifica que el cambio de color es totalmente evidente como es mostrado visualmente en las Figuras 10 y 11 anteriormente reportadas, las cuales demuestran las propiedades fotocatalíticas que el TiO_2 provee a la fibra siendo capaces de degradar colorantes orgánicos traducida a una capacidad *self-cleaning* de las mismas.

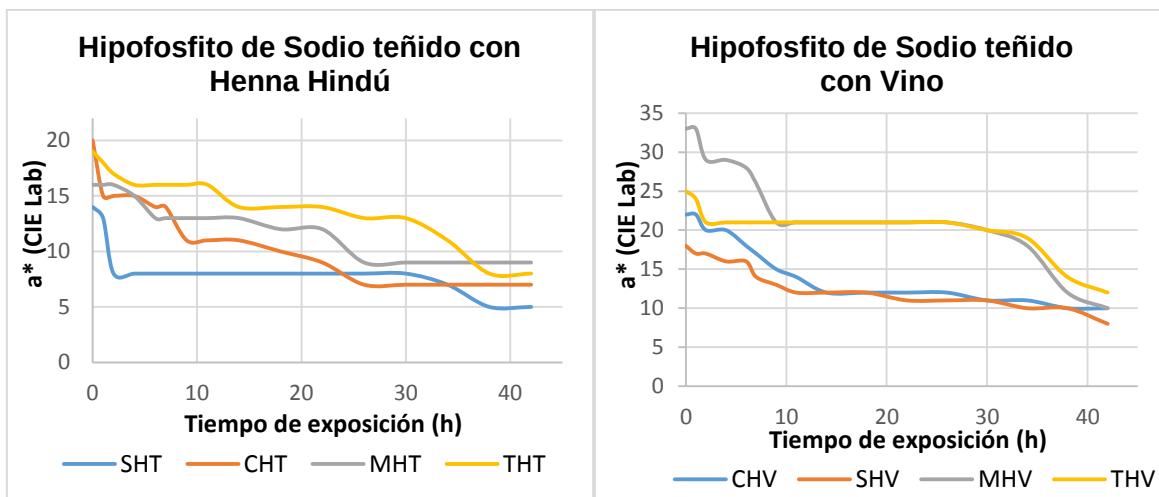


Figura 14 Variación de la coordenada a^* en función del tiempo de las muestras de Hipofosfito de sodio teñidas con vino y tintura.

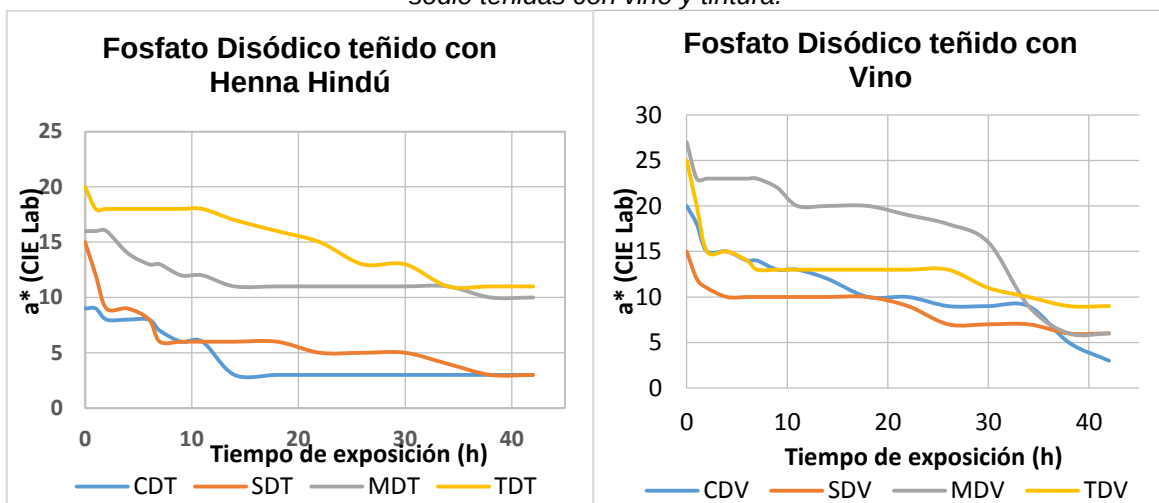


Figura 15 Variación de la coordenada a^* en función del tiempo de las muestras de Fosfato disódico teñidas con vino y tintura.

En las figuras 14 y 15 se muestran las variaciones en las coordenadas colorimétricas a^* en función del tiempo para las muestras nanoestructuradas teñidas con vino y tintura. En particular la coordenada a^* es evaluada desde el momento donde las muestras tuvieron una coloración inicial roja para el vino y negra para la henna hindú después de la aplicación de estos colorantes. Para los ensayos donde las muestras fueron teñidas con henna hindú se observa una fuerte disminución del valor a^* en las primeras horas de iluminación. El valor de partida de la coordenada a^* para las muestras SHT es muy alta con respecto al valor de a^* de las demás muestras.

Después de 10 horas la velocidad de disminución de las coordenadas a^* tiene el mismo comportamiento para todas las muestras, estos resultados indican que la fotocatalisis ha sido eficaz dentro de las primeras 10 horas de irradiación UV, independientemente del colorante utilizado para teñir las muestras.

A pesar de que la prueba utiliza el método de colorimetría, esta no representa totalmente los fenómenos físicos y químicos que se producen en la degradación de contaminantes orgánicos presentes en los procesos de TiO_2 (Fujishima et al., 1999). Por esta razón nuestra actividad va dirigida al evaluación de la eficacia del tratamiento realizado a las muestras, y la verificación de su actividad fotocatalítica a la exposición de irradiación UV.

Donde se lograron usar las coordenadas extraídas y puestas como color sólido siendo representadas en forma de gradiente de color para la decoloración en el rango de tiempo respectivo a cada muestra como se observa en la Tabla 7 (Berns, 2000).

Tabla 7 Resultados cambio de coloración (ΔE) para Fosfato disódico e Hipofosfito de sodio

FOSFATO DISODICO								HIPOFOSFITO DE SODIO							
VINO				TINTURA				VINO				TINTURA			
CD	SD	MD	TD	CD	SD	MD	TD	CH	SH	MH	TH	CH	SH	MH	TH
8	5	6	6	3	4	5	6	7	6	6	6	5	5	3	4

Siguiendo los valores de tolerancia donde,

$\Delta E = 2,0$ (invisible)

$\Delta E = 3,5$ (poco visible)

$\Delta E = 5,0 - 7,0$ (visible)

Con esto se dice que las muestras teñidas con vino tienen una diferencia promedio de color (ΔE) mayor durante las 42 horas, este cambio de color se logra observar con mayor facilidad, mientras que las muestras teñidas con la Henna Hindú presentan una diferencia de color (ΔE) menor, por tanto, su cambio es más difícil de apreciar

3.4 Análisis de Costos

Los costos iniciales de los reactivos empleados para la experimentación, son los precios sugeridos por la compañía Alfa Aesar para los años (2013-2015) en dólares por Kg; los costos totales reportados en la Tabla 8 se realizaron con los cantidades necesarias en nuestra investigación (1.2g ácido y 1g catalizador) y una propuesta a macroescala (1.2Kg ácido y 1Kg catalizador).

Tabla 8 Costos para cada compuesto usado en la investigación

	\$ / Kg	Macroescala (\$)	Investigación (\$)
Ácido Succínico	70,6	84,72	0.08472
Ácido Tartárico	150,8	180,96	0.18096
Ácido Málico	54,8	65,76	0.06576
Ácido Cítrico	29,2	35,04	0.03504
Hipofosfito de Sodio	69,2	69,2	0.0692
Fosfato Disódico	10,63	10,63	0.01063

En las tablas 9 y 10 se reportó el porcentaje de reducción en costos para cada ensayo realizado, donde dicho porcentaje de reducción se calculó respecto al ensayo de SH de

literatura, obteniendo una reducción en los costos de nanoestructuración mayor en los ensayos CD y CH que justamente fueron uno de los propuestos durante esta investigación.

Tabla 9 Porcentaje de reducción de costos para los ensayos con Hipofosfito de sodio

ENSAYO	COSTO	COSTO ÁCIDO + CATALIZADOR	% REDUCCION
TH	84,72	250,16	-----
SH	180,96	153,92	0
MH	65,76	134,96	12,31808732
CH	35,04	104,24	32,27650728

Tabla 10 Porcentaje de reducción de costos para los ensayos con Fosfato Disódico

ENSAYO	COSTO	COSTO ÁCIDO + CATALIZADOR	% REDUCCION
TD	84,72	191,59	-----
SD	180,96	95,35	0
MD	65,76	76,39	19,88463555
CD	35,04	45,67	52,10277923

En la Tabla 9 y 10 se muestran los costos totales (Ácido + Catalizador) para cada ensayo, donde se observa que los ensayos realizados con el ácido cítrico tienen un costo menor en comparación con los demás ensayos, donde se obtuvo un porcentaje de reducción en costos del 32,27% con el uso de H como catalizador y 52,10% con el uso de D como catalizador respecto al ácido succínico con hipofosfito de sodio el cual es usado por Meilert.

Finalmente, las fibras de yute nanoestructuradas (CD) fueron tejidos con algodón orgánico (1 fibra en urdimbre : 3 fibras en trama) en la Escuela de Artes y Oficios Santo Domingo (Bogotá, Colombia). A partir de las piezas textiles se los estudiantes del Semillero de Diseño y Gestión de la Moda de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, confeccionaron las prendas *prêt-à-porter* que se muestran en la Figura 17.

4 BIBLIOGRAFÍA

Alvarez,E., Martinez,D., Rodríguez. (2006). Estudio sobre los materiales compuestos reforzados y las principales que se utilizan como refuerzo.

American society for testing and materials. (1996). *ASTM D3822-07. Standard test method for tensile properties of single textil fibers.*

Berns, R. (2000). *Billmeyer and Saltzman's Principles of color technology* (3rd ed.)

Bonilla, J., Borrachero, M., Ochoa, J. & Payá J. (2013, Efecto de un aditivo extraído de la planta Agave americana sobre las propiedades físicas y mecánicas de un yeso.63, 6.

Campus, F., Bonhote, P., Grätzel, M., Heinen, S., & Walder, L. (1999). Solar Mater Energía. [Las células solares] 56, 281-297.

Corrales,F.,Vilaseca,F.,Llop,M.,Gironès,J. (2007). Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. *Journal of Hazardous Materials.*

FAO,Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (Ed.). (2004). *Documentos de la FAO sobre productos básicos y comercio.* Roma:

FAO. (2009). *Año internacional de la Fibras naturales.* Retrieved Octubre/15, 2015, from <http://www.naturalfibres2009.org/es/aifn/>

Fernandez, G. (2015). *Sintesis de anhídridos a partir de ácidos carboxílicos.* Retrieved Febrero 15, 2016, from <http://www.quimicaorganica.org/acidos-carboxilicos/428-sintesis-de-anhidridos-a-partir-de-acidos-carboxilicos.html>

Fletcher, K., Grose, L., & Hawyken, P. (2012). *Gestionar la sostenibilidad en la moda:Diseñar para cambiar materiales, procesos, distribución, consumo* BLUME (Naturart).

Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe T. (1999). *TiO₂ photocatalysis: Fundamentals and Applications* (1st ed.). Tokio:

Kale,R.,Meena,C. (2012). Synthesis of Titanium dioxide Nanoparticles and Application on Nylon fabric using Layer by Layer technique for Antimicrobial Property.

Lee, P. (2013). Indumentaria que cambia de color inspirada en la Biomimética.

Matus, K., Hutchison, J.M., Peoples, R., Rung, S. & Tanguay, R.L. Green nanotechnology challenges and opportunities. June 2011.

Meilert, K., Laub, D., & Kiwi, J. (2005). Photocatalytic sel-cleaning of modifies cotton textiles by TiO₂ Clusters attached by chemical spacers.237, 101.

Mettler-Toledo. (2011). In AG Laboratory & Weighing Technologies (Ed.), *Operating Instructions:Moisture Analyzer HB43-S* Retrieved from http://us.mt.com/dam/product_organizations/laboratory_weighing/moisture/products/hb43_s/documentation/en/HB43-S_OI_en_11780961A.pdf

Militky, J & Koemenakova, D. 2013. Nanoparticles in the textile industry. Coimbatore, India. Souvenir of 3rd International Science Congress

Moreno, L.E., Trujillo, E.E. y Osorio L.R. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de *GUADUA ANGUSTIFOLIA*.

Müssing, J. (Ed.). (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. United Kingdom: WILEY.

Ordoñez, M., Sánchez, M. (2013). Iniciación en materiales, productos y procesos textiles.

Ortiz, P., Ovalle, S., Blanco, C., & Combariza, M. (2014). Síntesis in situ de nanopartículas de óxido de hierro soportadas en fibras de fique y su uso en la degradación de colorantes. Medellín, Colombia. Revista colombiana de materiales. N.5.pp 152-158.

Pooja. (2005). In Departamento de botánica (Ed.), *Economic Botany*. Delhi: Arora Offset press.

Rojo, F. (2006). *Tablas de Espectroscopía Infrarroja*

Roshan, P. (2014). Easy care finishes for textiles. *Functional finishes for textiles* (pp. 227) The textile institute.

Roul, C. (2009). *The International Jute Commodity System*. New Delhi: Northern Book Centre.

Thomas et al. (2015). International Journal of Biological Macromolecules.81, 768-777.

Vargas, M. A., Ochoa, Y. H., Ortégón, Y., Mosquera, P., Rodríguez, J., & Camargo, R. J. (2011). Nanopartículas de TiO₂, fase anatasa, sintetizadas por métodos químicos.29

Veronica,L.,Dario, I.,Giraldo,A. (2009). *Cuantificación de celulosa proveniente de residuos de la industria del mueble*.

William,F., Smith,J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (4th ed.). Mexico: McGraw-Hill.