

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

**Estudio del efecto de soluciones acuosas de H_2O_2 por inmersión para el
blanqueamiento de fibras de fique y piña a escala piloto**

Sonia Constanza Muñoz Ramírez y Alejandra Yanez Bautista

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

Luz Marina Ballesteros Rueda

Doctora en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Codirector

German Adolfo Díaz Ramírez

Doctor en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	8
1 Objetivos.....	10
1.1 Objetivo general	10
1.2 Objetivos específicos	10
2 Marco teórico.....	11
3 Estado del arte	13
3.1 Antecedentes Internacionales	13
3.2 Antecedentes nacionales.....	14
4 Descripción metodológica	16
4.1 Identificar condiciones	16
4.2 Evaluar propiedades mecánicas.....	20
4.3 Escalado planta piloto.....	22
5 Resultados.....	23
5.1 Identificación condiciones	23
5.2 Evaluación propiedades mecánicas	26
5.3 Escalado planta piloto.....	32
6 Conclusiones.....	37
Referencias bibliográficas	38
Apéndice.....	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Porcentaje de Blanqueamiento y Propiedades de las Fibras de Fique y Fique + UV	33
Tabla 2. % de Blanqueo y Propiedades de las Fibras de Piña y Piña + UV	34
Tabla 3. Comparativa de Propiedades Mecánicas de las Fibras Obtenidas en la Literatura y Experimentalmente.	35
Tabla 4. % de Blanqueo a Escala Piloto y Laboratorio	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Metodología para el Proceso de Blanqueamiento de Fibras de Fique y Piña	16
Figura 2. Imágenes del Proceso de Inmersión	17
Figura 3. Imágenes del Proceso de Cortado	19
Figura 4. Imágenes del Proceso de Prensado	19
Figura 5. Probetas para Ensayos de Tracción	21
Figura 6. Micrografías para Calculo Área de la Sección Transversal	21
Figura 7. Imágenes del Proceso para Escalado en Planta Piloto	22
Figura 8. % de Blanqueamiento para las Fibras de Fique vs el Tiempo de Inmersión a Concentraciones de H_2O_2 de 1, 5 y 10% p/p y M_o FIQUE	24
Figura 9. % de blanqueamiento para las fibras de piña vs el tiempo de inmersión a concentraciones de H_2O_2 de 1, 5 y 10% p/p y M_o PIÑA	25
Figura 10. Resistencia Máxima para las Fibras de Fique Según la Concentración de H_2O_2 y el Tiempo de Inmersión	28
Figura 11. Resistencia máxima para las Fibras de Piña Según la Concentración de H_2O_2 y el Tiempo de Inmersión	29
Figura 12. Módulo de Elasticidad para las Fibras de Fique Según la Concentración de H_2O_2 y el Tiempo de Inmersión	31
Figura 13. Módulo de elasticidad para las Fibras de Piña Según la Concentración de H_2O_2 y el Tiempo de Inmersión	32
Figura 14. Fibras de Piña y Fique sin Tratamiento y con Tratamiento de Blanqueo a Escala Piloto	36

Lista de Apéndice

	Pág.
Apéndice A. % de blanqueo fibras de fique, concentración de H ₂ O ₂ , tiempo de inmersión y pH	41
Apéndice B. Tabla de % blanqueo fibras de fique+UV, concentración de H ₂ O ₂ , tiempo de inmersión y pH	42
Apéndice C. Tabla de % Blanqueo Fibras de Piña, Concentración de H ₂ O ₂ , Tiempo de Inmersión y pH	43
Apéndice D. Tabla de % Blanqueo Fibras de Piña+UV, Concentración de H ₂ O ₂ , Tiempo de Inmersión y pH	44
Apéndice E. Tabla de Repetición de Experimentos Fique y Fique +UV	45
Apéndice F. Repetición Experimentos Piña y Piña + UV	46
Apéndice G. Desviación Estándar en Medición del % Blancura con el medidor de Blancura Portátil GLTL para las Fibras de Fique y Fique + UV	47
Apéndice H. Desviación Estándar en Medición del % Blancura con el Medidor de Blancura Portátil GLTL para las Fibras de Piña y Piña + UV	48
Apéndice I. Área Promedio de Sección Transversal de Fibras de Fique y Desviación Estándar	49
Apéndice J. Área Promedio de Sección Transversal de Fibras de Piña y Desviación Estándar	49

Resumen

Título: Estudio del efecto de soluciones acuosas de H₂O₂ por inmersión para el blanqueamiento de fibras de fique y piña a escala piloto. *

Autor: Sonia Constanza Muñoz Ramírez y Alejandra Yanez Bautista **

Palabras clave: Blanqueo, Fibras naturales, Peróxido de hidrógeno, Fique, Piña.

Descripción:

Colombia es reconocida como el mayor productor a nivel mundial de fibras de fique y ocupa el décimo lugar en el cultivo de piña, según lo informado por la FAO. Esto subraya la importancia de estos productos agrícolas en el entorno nacional. En el caso de que estas fibras se utilicen para la manufactura de hilos y tejidos artesanales, es recomendable un procedimiento de blanqueamiento de las fibras, tal que permita postprocesos de teñido en colores que hasta ahora no han sido posibles debido a su pigmentación amarillenta inherente. En el presente estudio se empleó peróxido de hidrógeno como componente blanqueante oxidativo, con el fin de promover la liberación acelerada de oxígeno mediante la ayuda de catalizadores como hidróxido de sodio y silicato de sodio. Por otra parte, se propuso un blanqueo químico mediante un aporte de energía facilitado por la irradiación ultravioleta. Se investigó el impacto de la concentración de H₂O₂ como agente blanqueante, la duración de la inmersión de la fibra y la exposición a los rayos UV en el proceso de blanqueamiento de las fibras de fique y piña. La metodología de investigación comprendió dos fases centradas en determinar las condiciones óptimas para el blanqueamiento de las fibras y evaluar las consiguientes alteraciones en las propiedades físicas y mecánicas. En el estudio se concluyó que las concentraciones elevadas de H₂O₂ se correlacionan con un aumento en el porcentaje de blanqueamiento, pero también inducen un mayor deterioro de la fibra. Además, la radiación UV contribuye al blanqueamiento de las fibras, aunque a expensas de las propiedades mecánicas de las fibras. En última instancia, se comprobó que el H₂O₂ por sí solo, sin un catalizador, no produce efectos blanqueantes sustanciales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Luz Marina Ballesteros Rueda. Doctora en Electroquímica, Ciencia y Tecnología. Codirector: Germán Aldo Díaz Ramírez. Doctor en Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Study on the Effect of Aqueous H₂O₂ Solutions for Whitening Fique and Pineapple Fibers at a Pilot Scale.

Authors: Sonia Constanza Muñoz Ramírez and Alejandra Yanez Bautista.

Keywords: Whitening, Natural fibers, Hydrogen peroxide, Fique, Pineapple.

Description:

Colombia is recognized as the world's largest producer of fique fibers and ranks tenth in pineapple cultivation, according to the FAO. This highlights the significance of these agricultural products within the national context. When these fibers are used for crafting yarns and artisanal fabrics, a whitening procedure is recommended to enable post-dyeing processes in colors that have been previously unattainable due to their inherent yellowish pigmentation. In this study, hydrogen peroxide was used as an oxidative whitening agent to promote accelerated oxygen release, facilitated by catalysts such as sodium hydroxide and sodium silicate. Additionally, chemical bleaching was proposed with an energy input facilitated by ultraviolet irradiation. The study investigated the impact of H₂O₂ concentration as a whitening agent, the duration of fiber immersion, and UV exposure on the whitening process of fique and pineapple fibers. The research methodology involved two phases focused on determining optimal conditions for fiber whitening and assessing subsequent changes in physical and mechanical properties. The study concluded that higher H₂O₂ concentrations correlate with increased whitening percentage but also induce greater fiber degradation. Additionally, UV radiation contributes to fiber whitening, albeit at the expense of the fibers' mechanical properties. Ultimately, it was verified that H₂O₂ alone, without a catalyst, does not produce substantial whitening effects.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Luz Marina Ballesteros Rueda, Ph.D in Electrochemistry, Science and Technology. Co-director: Germán Aldo Díaz Ramírez. Ph.D in Materials Engineering.

Introducción

El uso de fibras naturales ha sido parte integral en el desarrollo cultural e industrial de diferentes civilizaciones durante siglos, esta actividad suele tener un impacto positivo ya que permite promover la producción local y el trabajo artesanal, por otra parte, también tiene un valor cultural significativo en distintos grupos étnicos porque permiten y ayudan a preservar diferentes prácticas de recolección, fabricación, manufacturación y técnicas de tejido que emplean estos materiales, afianzando así la transmisión de estos conocimientos de generación en generación (España Espinoza, 2019). Estas fibras se obtienen de distintas fuentes ya sean vegetales o animales, las cuales tienen como finalidad una amplia gama de usos y aplicaciones ya sea desde la artesanía tradicional hasta llegar a ser parte fundamental en la industria textil y manufacturera colombiana, puesto que, el país es el mayor productor de fique a nivel mundial (Cordero, Ortiz , & Paredes, 2021), además ocupa el décimo lugar en producción de piña según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) (Delgado, 2021), razón por la cual son cultivos de importancia en el contexto nacional.

El cambio más común que se observa en las fibras es el amarilleamiento provocado por la exposición al oxígeno presente en el aire y a la radiación ultravioleta (Namgoung, 2011). Lo anterior no es deseable para aplicaciones en donde se requiere tinturar las fibras para obtener hilos y textiles artesanales, en cuyo caso se deberían someter a un proceso de blanqueamiento; por este motivo, la aplicación de colorantes de gamas novedosas y colores vivos requieren partir desde el color blanco hasta el tono deseado.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

El blanqueamiento es un proceso químico utilizado para eliminar impurezas y pigmentos no deseados de las fibras naturales, este proceso es indispensable cuando se desean realizar coloraciones de tonos claros (Artesanias de Colombia, 2018). El peróxido de hidrógeno es uno de los agentes blanqueantes más eficientes. La propiedad blanqueante se atribuye a la liberación de oxígeno durante su descomposición (Gacén, 1969), la cual ocurre de forma lenta, pero puede acelerarse en presencia de catalizadores que activan su acción blanqueante (Pérez Espinosa, 2015); a su vez, a mayor temperatura y pH, la descomposición del H₂O₂ es más rápida. Es decir, el blanqueo químico requiere un consumo de energía acorde con la velocidad esperada del proceso. (Namgoung, 2011) afirma que “La energía de la radiación ultravioleta (UV) de la luz solar causa la ruptura de las moléculas de oxígeno atmosférico produciendo el oxígeno naciente, este oxígeno naciente es necesario para el blanqueamiento oxidativo”, por lo que el requerimiento de energía puede ser suministrado por la incidencia de esta radiación como alternativa a usar a elevadas temperaturas, de modo que se disminuyan los costos del proceso.

Se espera que un proceso de blanqueo oxidativo logre ahorrar energía, así como agua y otros recursos, al tiempo que reduzca la huella de carbono y los efluentes contaminantes del proceso. Por esto, es necesario desarrollar una estrategia que cumpla con este propósito (Qing, Run, Huiyu, & Yuyang, 2023). A raíz de lo descrito anteriormente, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles deben ser las condiciones de concentración del agente blanqueante, tiempo de inmersión, pH e incidencia de la radiación ultravioleta, para lograr el máximo nivel de blancura en las fibras de fique y piña, minimizando el deterioro en sus propiedades mecánicas, que potencialmente se puedan utilizar en la elaboración de productos artesanales colombianos?

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de la concentración del peróxido de hidrógeno como agente blanqueante, así como el tiempo de inmersión de las fibras y la radiación UV sobre el blanqueamiento de fibras de fique y piña, tal que estas condiciones estén acordes a una producción a escala piloto.

1.2 Objetivos específicos

Identificar las condiciones que permiten alcanzar un índice de blancura de al menos un 80% en las fibras de fique y piña, modificando variables del proceso.

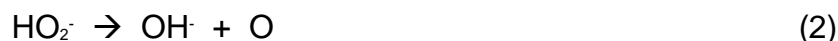
Evaluar el efecto del proceso de blanqueamiento de las fibras de fique y piña sobre sus propiedades físicas y mecánicas, mediante ensayos de tracción bajo la norma ASTM D2256.

Aplicar las condiciones previamente establecidas para un proceso de planta piloto escalado, que permita el blanqueamiento de 1 kg de las fibras, utilizando el método de inmersión.

2 Marco teórico

El blanqueamiento de las fibras de fique y piña es un proceso clave para mejorar sus características estéticas y funcionales, permitiendo su integración en productos de alta calidad y sostenibilidad. El desarrollo de técnicas óptimas de blanqueamiento no solo puede mejorar la apariencia de las fibras, sino que también garantizar su durabilidad y versatilidad en diversas aplicaciones industriales y artesanales.

En uno de los procesos de blanqueamiento se usa peróxido de hidrógeno (H₂O₂), este llegó a remplazar otros agentes blanqueantes presentes en el mercado desde 1930 debido a su eficiencia. Sus propiedades blanqueadoras se deben al oxígeno liberado en su descomposición:



El componente activo del H₂O₂ es extremadamente inestable y no se aprovecharía lo suficiente si no se estabiliza; en presencia de catalizadores, a mayor temperatura (Flores et al., 2019) y pH la descomposición es más rápida, a su vez, la formación de O₂ (Gacén, 1969).

En cuanto a los catalizadores, el silicato de sodio (Na₂SiO₃) juega un papel fundamental al actuar como detergente al facilitar el acceso del H₂O₂ a la fibra, mientras que el hidróxido de sodio (NaOH) se utiliza como activador alcalino y estabilizador, elevando el pH para acelerar la liberación de oxígeno (Namgoung, 2011).

La velocidad del blanqueamiento está directamente relacionada con el pH del sistema, el cual puede ser ajustado mediante la adición controlada de NaOH y Na₂SiO₃, de modo que

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

se alcance la alcalinidad necesaria para que la velocidad de formación del oxígeno sea análoga a la de su captación por la fibra (Pérez Espinosa, 2015).

A su vez, conforme aumenta la temperatura (90-120 °C) se incrementa la velocidad de descomposición del peróxido, favoreciendo el proceso de blanqueo; es por esto que temperaturas más bajas requieren tiempos de inmersión más prolongados. Además, la descomposición del peróxido es mayor cuánto menor es la concentración inicial, pero el consumo por unidad de peso de fibra aumenta con la concentración inicial del baño (Gacén, 1969). Por esto, al sobrepasar cierto intervalo de concentración, la degradación y el nivel de blancura de la fibra aumentan, por lo que se recomienda que la concentración de la solución esté entre 5-10 % (peso/volumen) (Namgoung, 2011).

El tiempo necesario para el tratamiento depende de casi todas las variables. A altas temperaturas, el proceso puede durar entre 1 y 4 horas, mientras que a temperatura ambiente se requieren de 18 a 24 horas (Haque, Mojumdar, & Sazed Salman, 2014).

Otro aspecto relevante es la radiación ultravioleta. La exposición a la luz solar puede ser útil para el blanqueamiento oxidativo debido a la energía que genera la ruptura de moléculas de oxígeno atmosférico (Namgoung, 2011). Sin embargo, la intensidad del sol puede dañar las fibras, por lo que se prefiere el uso de lámparas UV controladas que emitan a 254 nm, ya que ofrecen mejores resultados y mayor estabilidad en el proceso (Bagnato, 2018).

En cuanto a las propiedades mecánicas, las fibras de fique sin tratamiento presentaron una resistencia a la tensión de 363.5 ± 143.6 MPa y un módulo de elasticidad de 6.022 ± 2.735 GPa. Por otro lado, las fibras de piña mostraron una resistencia a la tensión de $357.9 \pm$

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

105.2 MPa y un módulo de elasticidad de 7.289 ± 4.484 GPa (Daza Moreno & Garzón Moyano, 2023).

3 Estado del arte

3.1 Antecedentes Internacionales

En el artículo “Pulpeo de Cabuya” (Blanco M.L., 1991) se reportó un proceso de blanqueo de la pulpa en tres etapas secuenciales, separando 34 g de cabuya seca y refinada. En la primera etapa usaron 2 L de solución de hidróxido de sodio al 1% p/p, a 80°C por 45 min; en la segunda etapa, con 1.5 L de solución de peróxido de hidrógeno al 5% p/p, a 70°C por 45 min y en la tercera etapa, 1.5 L de solución de hipoclorito de sodio al 10% p/p, a 80°C por 30 min. Todas las etapas se hicieron en un proceso de inmersión sin agitación, posteriormente filtrado y lavado con agua. Los resultados arrojaron un aumento de blancura del 44,3% al 82.5%, esto medido en una escala de 0-100%, en donde 0 es negro.

En la investigación “The effect of fiber bleaching treatment on the properties of poly (lactic acid) / oil palm empty fruit bunch fiber composites” de (Rayung, y otros, 2014), se sometió la fibra de racimos de frutos vacíos de palma de aceite a blanqueo alcalino con peróxido de hidrógeno al 5% volumen, a un pH de 11 durante 90 minutos. Luego, se puso la fibra OPEFB (oil palm empty fruit bunches, según su nombre en inglés) en agua destilada a 70°C durante 4 horas, así limpiaron impurezas. Posteriormente, se secó en horno a 60°C durante 1 día. A estas fibras las denominan fibras blanqueadas (BF), pasando de un color marrón oscuro a un blanco óptimo, sin especificar escala cuantitativa de blanqueamiento.

3.2 Antecedentes nacionales

Según el artículo reporte del gobierno colombiano (Artesanías de Colombia, 2023), se tomó una muestra de 1 kg de cabuya o fibra, la cual se introdujo en una mezcla de 8 L de agua y 50 g de bisulfato de sodio, posteriormente se hirvió durante dos horas y se le agregaron 5 cucharadas de jabón en polvo. Después de lavar bien la muestra, se dejó en reposo en un recipiente con mezcla de agua caliente y dos frascos de agua oxigenada durante 30 minutos. Por último, se lavó bien para obtener la muestra blanqueada. De lo anterior, no se registró un porcentaje de blanqueo logrado cuantitativamente.

En un plan del gobierno colombiano llamado “ampliación cobertura geográfica y poblacional 2018” se brindó asesoría técnica para el mejoramiento de procesos productivos artesanales, a partir del cual se generó una catilla llamada “Manual para la tintura de fibras naturales con tintes industriales” (Artesanías de Colombia, 2018), en el cual se usó una solución alcalina al 3% de peróxido de hidrógeno a una temperatura entre 80 y 90 °C, teniendo en cuenta que, a temperatura ambiente la solución es estable. Sin embargo, también aconsejaron el blanqueo en frío, donde permaneció en reposo durante toda la noche por un periodo de 8 horas; asegurando que es un procedimiento para fibras de algodón y lana para conservar su suavidad. En seguida, se lavó la fibra con detergente disuelto en agua caliente durante 1 hora mínimo. De lo contrario, si se llegase a hacer el proceso en frío, se recomienda dejar la fibra en un recipiente con 20 o 30 L de agua durante toda la noche, por cada kilogramo de detergente. En dicho plan no se reportan resultados específicos del porcentaje de blanqueo obtenido.

En un proyecto de investigación, desarrollado en la ciudad de Cali, Colombia llamado “Catalasa para el manejo del peróxido de hidrógeno en la industria textil” (Pérez Espinosa, 2015), se aplicó peróxido de hidrógeno en las fibras de tejido o en forma de hilados para

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

blanquear y remover impurezas; esto con el fin de aplicar un tinte claro a las fibras. Debido a que es un proceso de blanqueamiento oxidativo, se llevó a cabo en condiciones alcalinas para generar el agente blanqueante activo (dióxido radical), usando como amortiguador de pH el silicato sódico que a su vez estabilizó el peróxido de hidrógeno.

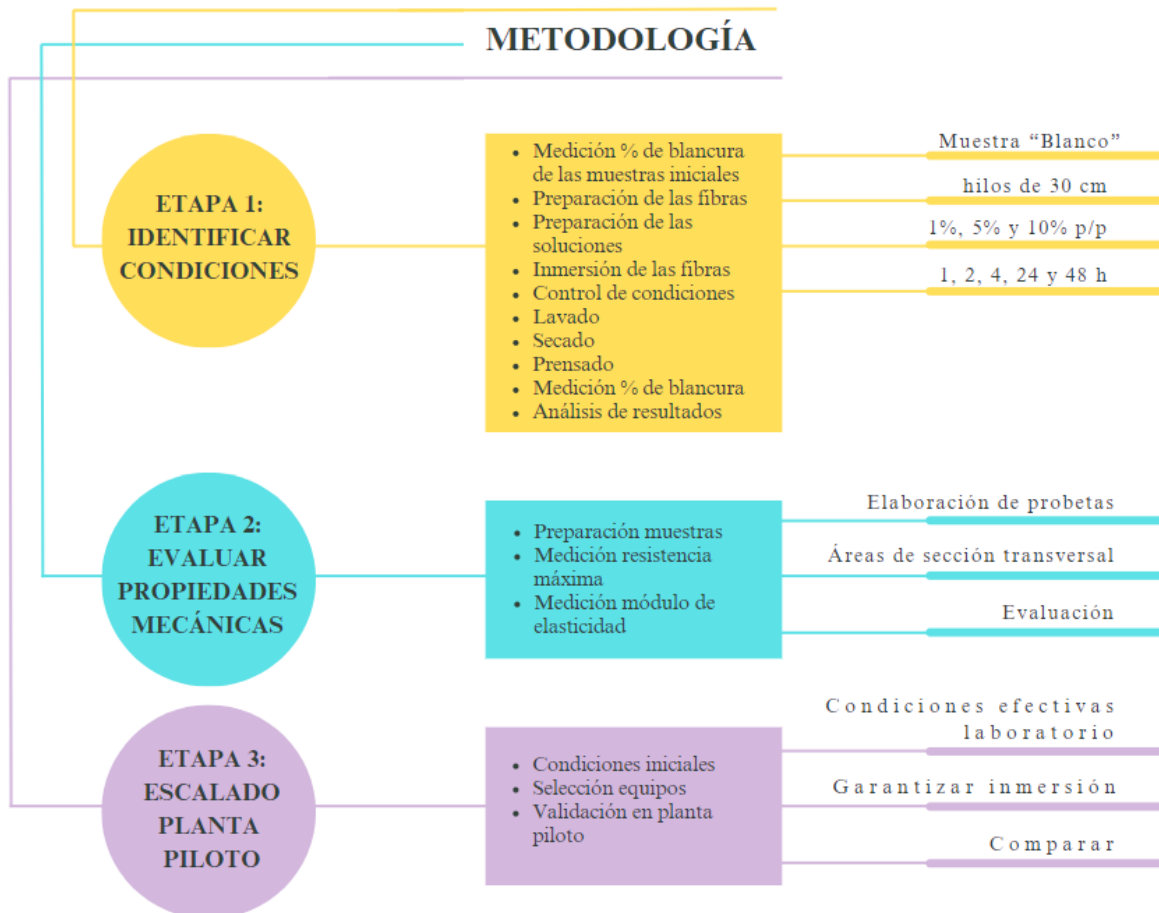
A lo largo de los años, varios estudios han explorado diferentes métodos de blanqueamiento de las fibras vegetales. Parra Campos (2020) empleó hipoclorito de sodio (NaClO) al 10% en condiciones específicas de temperatura y tiempo, logrando un blanqueamiento moderado. Orjuela (1996), por su parte, combinó bisulfato de sodio y agua oxigenada para mejorar el proceso de teñido de la cabuya, destacando la necesidad de estabilizar y controlar las condiciones del proceso para evitar daños en las fibras.

Se puede concluir que hay diferentes variables en el proceso de blanqueo, como la concentración del agente blanqueante, el tiempo de inmersión, en solución alcalina, a altas temperaturas o a temperatura ambiente, esta última requiriendo mayor tiempo de inmersión. Todas estas variables están relacionadas entre sí, e influyen una sobre la otra, pero falta un relacionamiento cualitativo con el porcentaje de blancura y el detrimento de las propiedades fisicoquímicas de las fibras. Asimismo, no hay investigaciones realizadas hasta el momento de la revisión bibliográfica sobre el blanqueamiento de las fibras de piña.

4 Descripción metodológica

Figura 1.

Metodología para el Proceso de Blanqueamiento de Fibras de Fique y Piña



4.1 Identificar condiciones

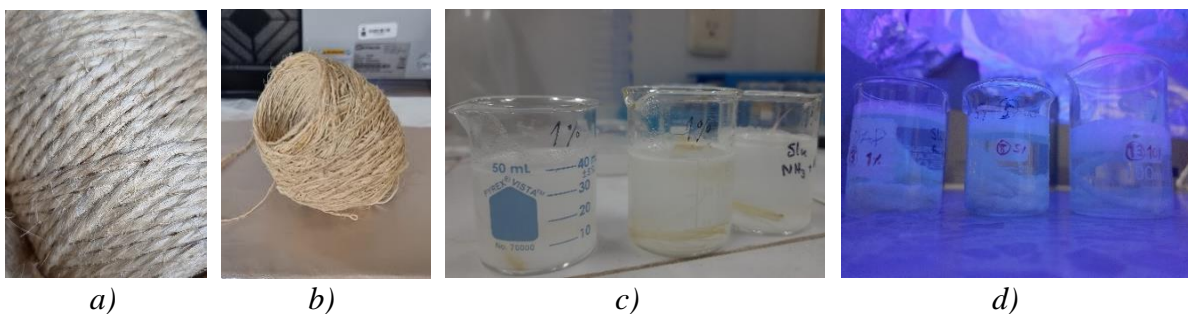
Para este proyecto de investigación, se usaron dos tipos de fibra vegetal. Las fibras de fique en forma de hilado, con textura uniforme (figura 2a), y las fibras de piña con hilado no uniforme (figura 2b). Se trabajaron 4 procesos, los cuales son: 1) 1.04 g de fibra de fique en solución acuosa bajo inmersión, expuestas a condiciones ambientales (figura 2c); 2) 1.04 g de fibra de fique en solución acuosa bajo inmersión, expuestas a radiación UV (figura 2.d);

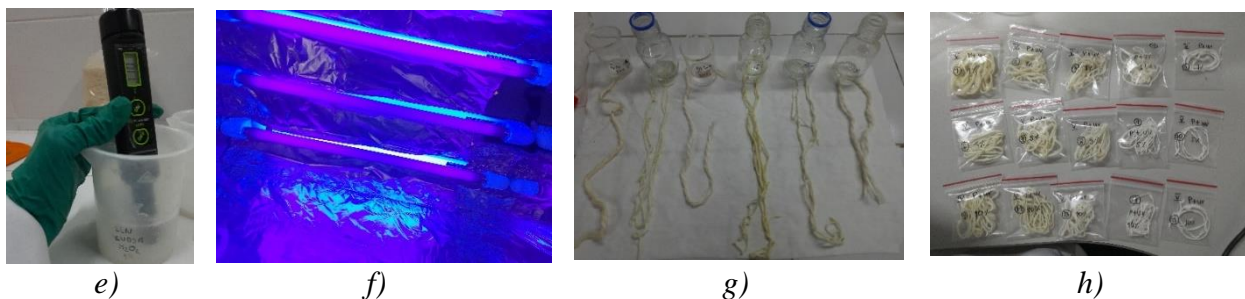
BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

3) 0.09 g de fibra de piña en solución acuosa bajo inmersión, expuestas a condiciones ambientales; 4) 0.09 g de fibra de piña en solución acuosa bajo inmersión, expuestas a radiación UV. Se usaron lámparas de luz UV a 254 nm (*figura 2f*).

Cada proceso tuvo variación en el tiempo de inmersión y la concentración. Se manejaron 5 tiempos diferentes (1, 2, 4, 24 y 48 horas) y 3 concentraciones del agente blanqueante (1%, 5% y 10% p/p de H₂O₂) en cada proceso. Por ende, se repitió 15 veces el tratamiento por cada proceso, variando las condiciones especificadas en la *Tabla 4*.

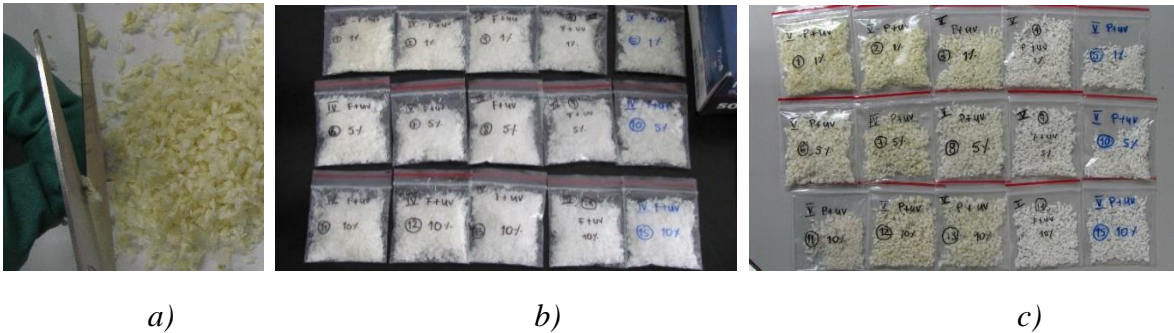
Para preparar la solución se añadieron hidróxido de sodio y silicato de sodio como catalizadores y agua destilada en proporciones según (Namgoung, 2011) y (Pérez Espinosa, 2015). Una vez se garantizó la completa dilución de los compuestos, se leyó el pH de cada una, los cuales variaron entre 10 y 12, un valor básico como lo recomiendan (Dipshika, Nabaneeta, Seiko, Robin, & Gautam, 2017), tal como se ve en la *figura 2e*. Seguido de esto, las fibras fueron secadas al medio ambiente (*figura 2g*); empacadas y rotuladas para la siguiente etapa como se puede observar en la *figura 2h*.

Figura 2.*Imágenes del Proceso de Inmersión*

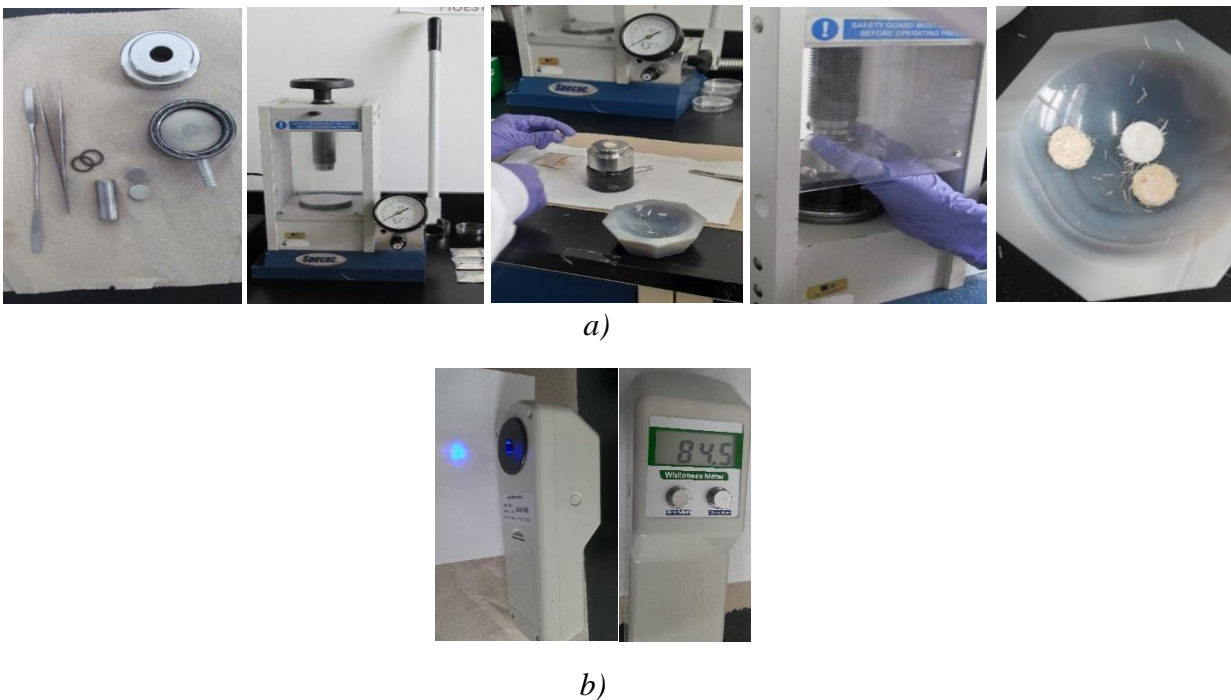
BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

Nota: a) Fibra de fique sin tratamiento (cordel de fique #2), b) Fibra de piña sin tratamiento (hilado), c) Inmersión de las fibras en condiciones ambientales, d) Inmersión de las fibras expuestas a radiación UV, e) Lámparas de luz UV a 254 nm, f) Medición pH alcalino, g) Secado de las fibras al medio ambiente, h) Fibras secas después del tratamiento de blanqueamiento.

Seguido de esto, se cortó minuciosamente cada fibra tratada como se ilustra en la *figura 3*, para llevarlas al proceso de prensado. Se usó la prensa hidráulica manual (Ltd., 2018) ubicada en la sede de Guatiguará de la UIS. Para las fibras de fique tratadas y cortadas, se trabajó a 2 toneladas de fuerza por 2 minutos para su prensado efectivo, mientras que, las fibras de piña se sometieron a las mismas toneladas de fuerza por 1 minuto. Esto con el fin de formar pastillas de 0.15 mm de diámetro; proceso el cual se puede apreciar en la *figura 4a*. Con ayuda del equipo medidor de blancura PCE-WSB (Ibérica, s.f.) se leyó el % de blanqueamiento de cada fibra (*figura 4b*), que se rige a partir de las normas ISO 2470-2688 y opera en un rango de 0-100, en donde 0% es negro y 100% es blanco; primero, se calibró el medidor, luego se introdujo la pastilla de fibra en el orificio del equipo y se registró el dato mostrado en la pantalla, se repitió la medición tres veces por cada lado de la pastilla para obtener un estadístico de datos y calcular la desviación estándar (*ver anexos Tabla 10 y 11*).

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2 **Figura 3.***Imágenes del Proceso de Cortado*

Nota: a) Proceso de cortado de las fibras tratadas b) Fibras de fique + radiación UV (F+UV), cortadas c) Fibras de piña + radiación UV (P+UV), cortadas.

Figura 4.*Imágenes del Proceso de Prensado*

Nota: a) Proceso de prensado, b) Medición del % de blanqueamiento con el “medidor de blancura PCE-WSB”

4.2 Evaluar propiedades mecánicas

Para evaluar las propiedades mecánicas se usaron fibras de 27 cm de longitud tanto de piña como de fique. Se elaboraron probetas con resina epóxica y fibra de vidrio, en donde se sujetaron las fibras por cada extremo con una distancia de 15 cm entre resina y resina, tal como se muestra en la *figura 5a*. Estas probetas (*figura 5b*) se someten a ensayo de tracción con una máquina universal de ensayos modelo MTS Bionix , ubicada en el laboratorio de ensayos de tracción en la escuela de ingeniería mecánica de la UIS. Proceso el cual se puede apreciar en las *figuras 5c y 5d*.

Una vez obtenidos los resultados arrojados por el mismo equipo, se elaboró otra probeta circular con ayuda de un tubo PVC. Primero se cortó el espacio donde se encontraba la fibra con la resina, para poder unir las pequeñas resinas rellenando nuevamente de resina epóxica, mezclando esta última a 60°C para evitar burbujas tal como se ilustra en la *figura 5e*. Posteriormente se pule la probeta con las muestras, ubicadas de tal manera que se pueda determinar el área de cada hilo. Este proceso se llevó a cabo lijando con lija #120 hasta llegar a una lija #1500. Asimismo, para terminar con un pulido fino se usó la pulidora ubicada en el laboratorio de metalografía de la UIS. Una vez conseguido el objetivo, se ubica la probeta en el microscopio y se toman micrografías de la sección transversal de las fibras con una escala de 200 μm (*figura 6a*).

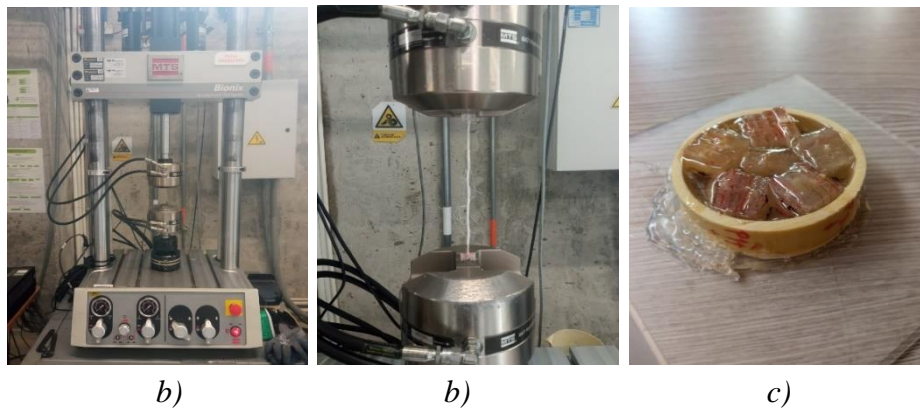
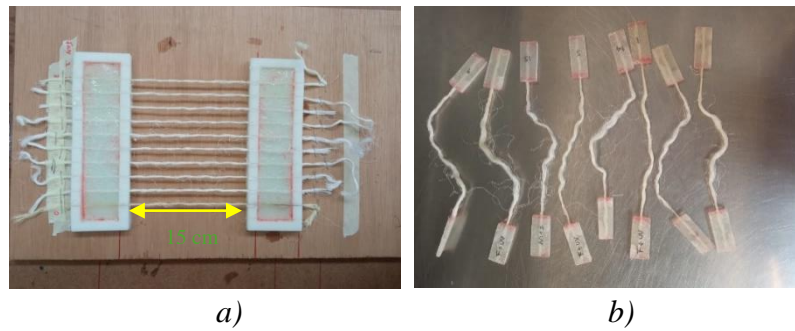
Con ayuda del software para tratamiento de imagen, FIJI (Eliceiri, Rasband, & Schneider, 2012) se calcula el área de la sección transversal de las fibras mediante las micrografías, como se evidencia en la *figura 6*. Con los valores de la fuerza axial máxima obtenidos en los ensayos de tracción y el área hallada, se calculó la resistencia máxima lo

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

cual ayuda a evaluar el efecto de los diferentes procesos de blanqueamiento en esta propiedad.

Figura 5.

Probetas para Ensayos de Tracción

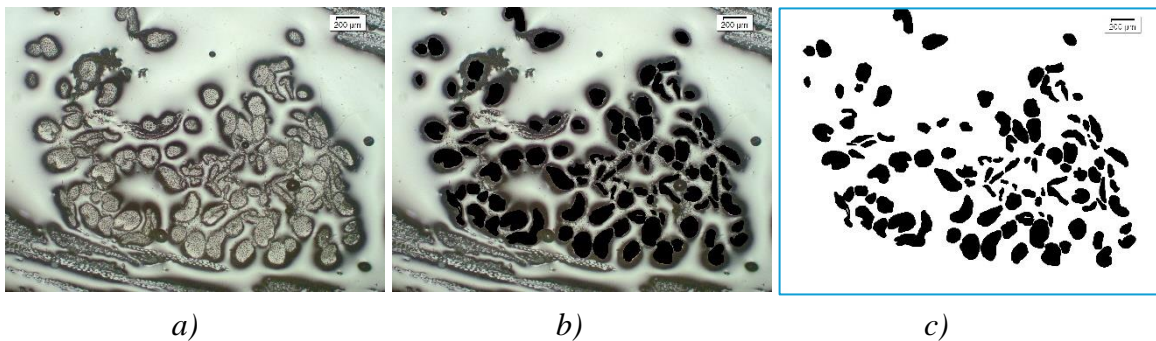


Nota: a)

Elaboración de probetas tracción, b) Probetas, c) Prensa hidráulica MTS, d) Ensayos de tracción, d) Elaboración de probetas micrográficas

Figura 6.

Micrografías para Calculo Área de la Sección Transversal



BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

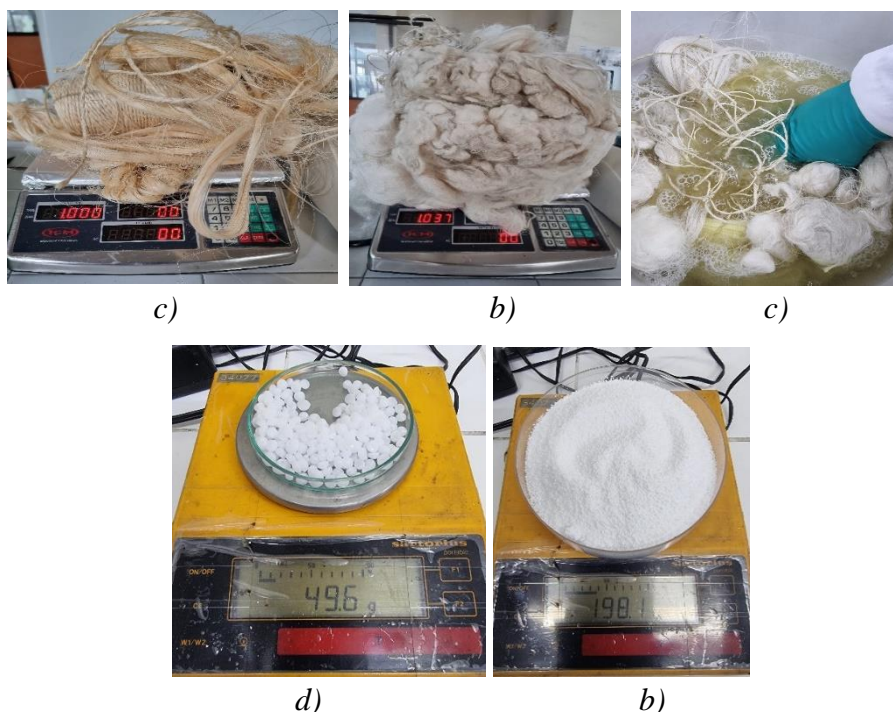
Nota: a) Micrografía de fique + UV al 5% p/p de H_2O_2 (24h), b) fibras pintadas en Fiji, c) Efecto de contraste para hallar el área de la sección transversal con el software Fiji.

4.3 Escalado planta piloto

Para llevar el proceso a escala piloto, se implementó el mismo procedimiento de la etapa 1, esta vez, usando 1 kg de cada fibra con las condiciones más apropiadas obtenidas del objetivo 1 y 2 (*figura 7*). Se garantizó la inmersión total de las fibras en la solución acuosa ubicando objetos de peso que impidieran salir a flote la fibra. Esta vez, se usaron fibras de fique y piña en hilos, mechones peinados y despeinados, todos inmersos en las soluciones acuosas para posteriormente comparar el porcentaje de blanqueamiento a escala piloto y a escala laboratorio.

Figura 7.

Imágenes del Proceso para Escalado en Planta Piloto



Nota: a) 1 kg de fibra de fique, b) 1 kg de fibra de piña, c) Inmersión de las fibras, d) cantidad de NaOH para el escalado piloto, e) Cantidad de Na_2SiO_3 para el escalado piloto

5 Resultados

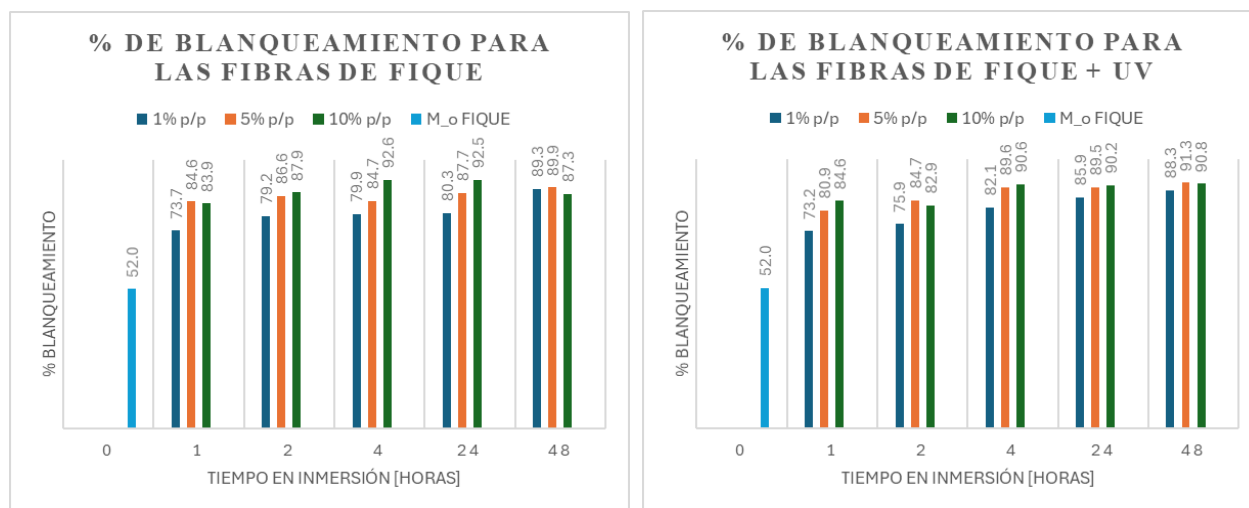
5.1 Identificación condiciones

Para la primera etapa metodológica se identificaron las condiciones para alcanzar un índice de blanqueamiento de al menos un 80% en las fibras de fique y piña. Aplicando la metodología antes descrita, teniendo en cuenta las variables: concentración de H₂O₂, el tiempo de inmersión y la exposición a radiación ultravioleta (UV) se obtuvieron los siguientes resultados:

El porcentaje máximo de blanqueamiento en las fibras de fique (92.6%), se logró a 4 horas de inmersión con una concentración al 10% p/p de H₂O₂, expuestas al ambiente (*figura 8a*). Mientras que, la *figura 8b* muestra que el máximo grado de blanqueamiento con exposición UV (91.2%), se obtuvo a 48 horas de inmersión al 5% p/p de H₂O₂. Asimismo, la muestra sin tratamiento (M_o FIQUE) arrojó un 52% de blanqueamiento como se evidencia en la figura 8.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Figura 8.**

% de Blanqueamiento para las Fibras de Fique vs el Tiempo de Inmersión a



Concentraciones de H₂O₂ de 1, 5 y 10% p/p y M_o FIQUE

a)

b)

Nota: M_o FIQUE: Muestra de fique sin tratamiento. 0% es negro, 100% es blanco.

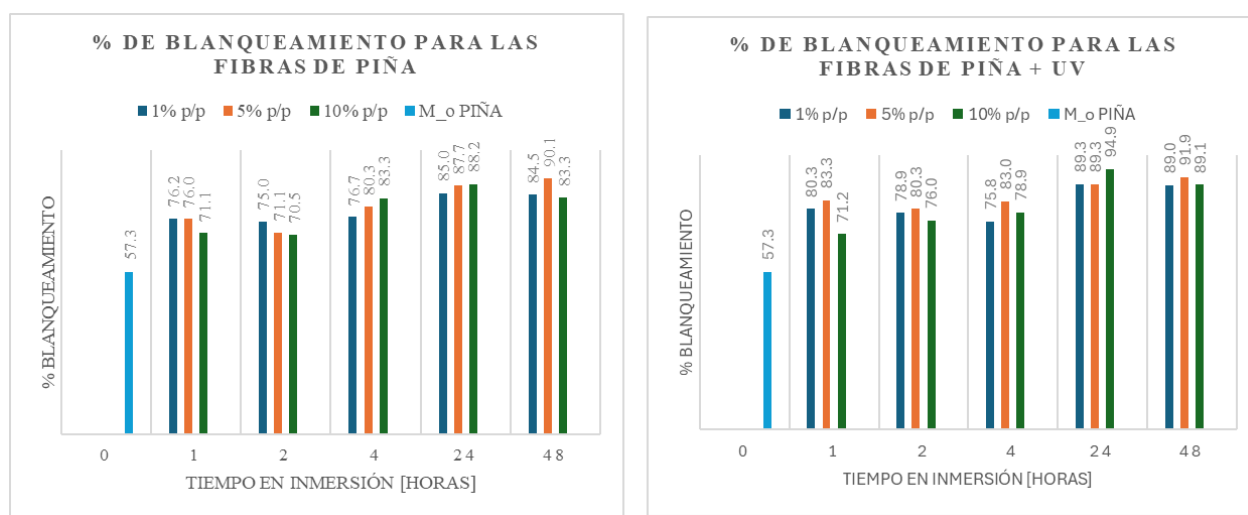
En la *figura 9b* se puede observar que el grado de blanqueamiento más alto en las fibras de piña se obtuvo con una solución al 10% p/p H₂O₂, con 24 horas de inmersión, expuestas a radiación UV con un 94.9%. Mientras que, el tratamiento con menos incidencia en los blanqueamientos de la fibra fueron los de 1 y 2 horas de inmersión, con 5% p/p H₂O₂ a exposición ambiente (71.1%), como se muestra en la *figura 9a*. Así mismo, se observa una clara incidencia positiva de los rayos UV sobre el blanqueamiento de las fibras de piña, ya que, al comparar el porcentaje de cada muestra en cualquier concentración, a las 48 horas, es mayor el grado de blanqueo en las fibras que son expuestas a los rayos UV que las que se tratan a condiciones del medio ambiente como lo muestra las *figuras 9a y 9b*. De este modo, se logró aumentar el grado de blanqueo en un 37.6% para las fibras de piña, teniendo en cuenta que la fibra sin tratamiento (M_o PIÑA) tuvo 57.3 % de blanqueamiento.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

Esto indica que el nivel de blancura aumenta con la concentración del agente blanqueante o con tiempos de inmersión prolongados. Así, se pueden lograr altos grados de blancura utilizando una baja concentración de agente blanqueante si se prolonga el tiempo de inmersión (*figuras 8 y 9*).

Figura 9.

% de blanqueamiento para las fibras de piña vs el tiempo de inmersión a concentraciones de H_2O_2 de 1, 5 y 10% p/p y M_o PIÑA



a)

b)

Nota: M_o PIÑA: Muestra de piña sin tratamiento. 0% es negro, 100% es blanco.

Las muestras sometidas a 1 y 2 horas de inmersión no muestran mayor cambio de nivel de blanqueo en los resultados (*figuras 8 y 9*); Por ende, se decide repetir el experimento 4 veces, con las muestras con tiempo de inmersión de 4, 24 y 48 horas, para obtener un estadístico de datos (ver anexos). Así mismo, la incidencia de rayos UV en las fibras de piña aportan energía a la reacción y aumentan el nivel de blanqueamiento con respecto a las fibras

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

que son expuestas al medio ambiente. Por el contrario, las fibras de fique se blanquean mejor sin exponerlas a radiación UV.

En todas las gráficas (*figuras 8 y 9*), se observa que la concentración 10% p/p de agente blanqueante produce los mejores resultados en términos de grados de blancura. Sin embargo, es crucial evaluar cómo esta concentración afecta las propiedades mecánicas de las fibras, para asegurar que el blanqueamiento sea efectivo según el futuro uso de la fibra. Por esta razón, una vez determinado el porcentaje de blanqueamiento de cada fibra, se desarrolla la etapa dos, destinada a evaluar las propiedades mecánicas de las fibras.

5.2 Evaluación propiedades mecánicas

Partiendo de la muestra cero de fique (M₀), que es la fibra sin tratamiento, se estima una resistencia máxima de 229 MPa (*figura 10*), a su vez, se registra en la misma, los resultados de la resistencia a la tracción para las fibras que se sometieron al proceso de blanqueamiento. Se registró una resistencia máxima (310.6 MPa) en la fibra que fue sometida a 1% p/p H₂O₂ con 48 horas de inmersión expuesta al medio ambiente (*figura 10b*).

Según (Asim et al., 2016), “los tratamientos químicos de las fibras aumentan las propiedades a la tensión de estas, removiendo lignina y hemicelulosas; cementándose con la celulosa”. Es por esto, que en la *figura 10b* se denota un crecimiento en la resistencia a la tracción a medida que va aumenta el tiempo de inmersión y la concentración del agente blanqueante.

Por otro lado, en la *figura 10a* se denota una alta influencia de la radiación UV en la resistencia, la fibra llegó a su tope de resistencia en solo 4 horas de inmersión para todas las concentraciones (1, 5 y 10% p/p H₂O₂). A medida que, la fibra permaneció más tiempo en la solución acuosa, su resistencia se vio afectada lo que causa debilitamiento en los filamentos.

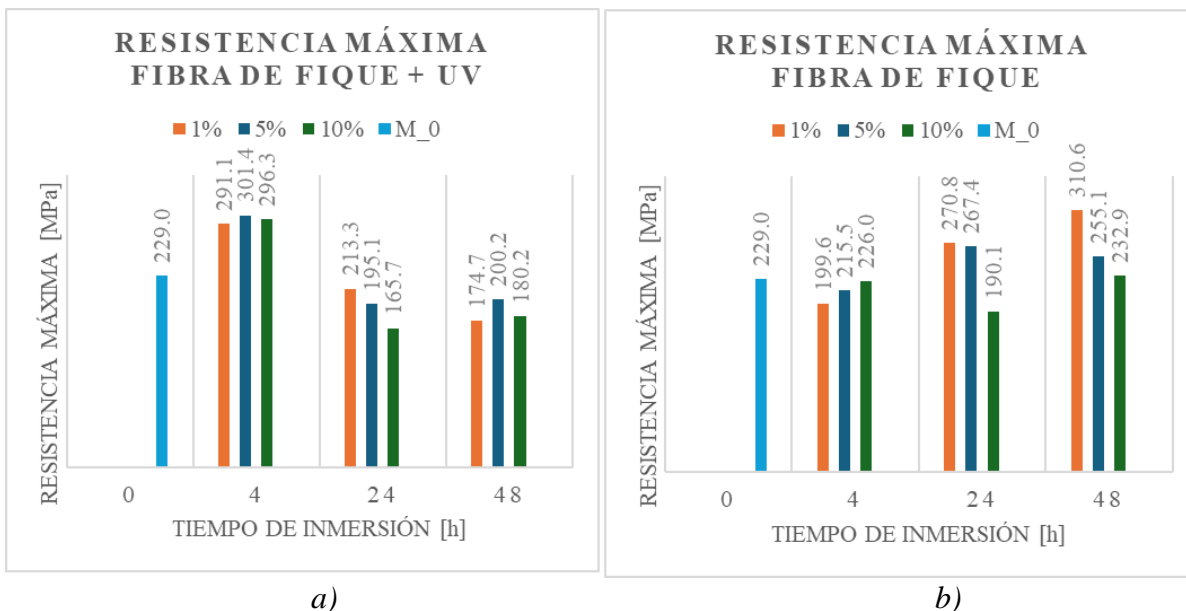
BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

El tratamiento impacta en la resistencia a la tracción de las fibras de fique, produciendo tanto incrementos como decrementos en esta propiedad. La exposición a rayos UV produce que la fibra se deteriore mucho más que cuando se somete al tratamiento a medio ambiente. Esto ratifica los hechos experimentales, ya que las fibras eran más débiles al tacto en comparación con la fibra sin tratamiento. La máxima resistencia a la tracción (301.4 MPa) bajo exposición a radiación UV, se alcanza en 4 horas con una concentración del 5 % p/p de H₂O₂ (*figura 10a*).

Con referencia al tratamiento de las fibras de fique expuestas al ambiente, la atenuación de las fibras se dio con 10% p/p H₂O₂ en cualquier tiempo de inmersión, por consiguiente, a mayor % de concentración de H₂O₂, mayor será la disminución de la resistencia máxima como se ilustra en la *figura 10b*.

Figura 10.

Resistencia Máxima para las Fibras de Fique Según la Concentración de H₂O₂ y el Tiempo de Inmersión



Nota: 1%, 5%, 10% son concentraciones p/p de H₂O₂ y M_0 es la fibra sin tratamiento

Por otro lado, para las fibras de piña, el comportamiento de la resistencia a la tracción es menos consistente. No obstante, se observa un incremento en la resistencia máxima al tratar las fibras con una solución al 1% de concentración durante un tiempo prolongado, alcanzando 224.2 MPa según la *figura 11b*. La exposición a radiación UV tiene un impacto significativo en la resistencia máxima de las fibras de piña, resultando en una disminución de la resistencia con tiempos de inmersión más cortos bajo UV. Esto explica que, al lavarse las fibras con las manos, usando agua destilada después de cada tratamiento, éstas se rompían con el mínimo esfuerzo.

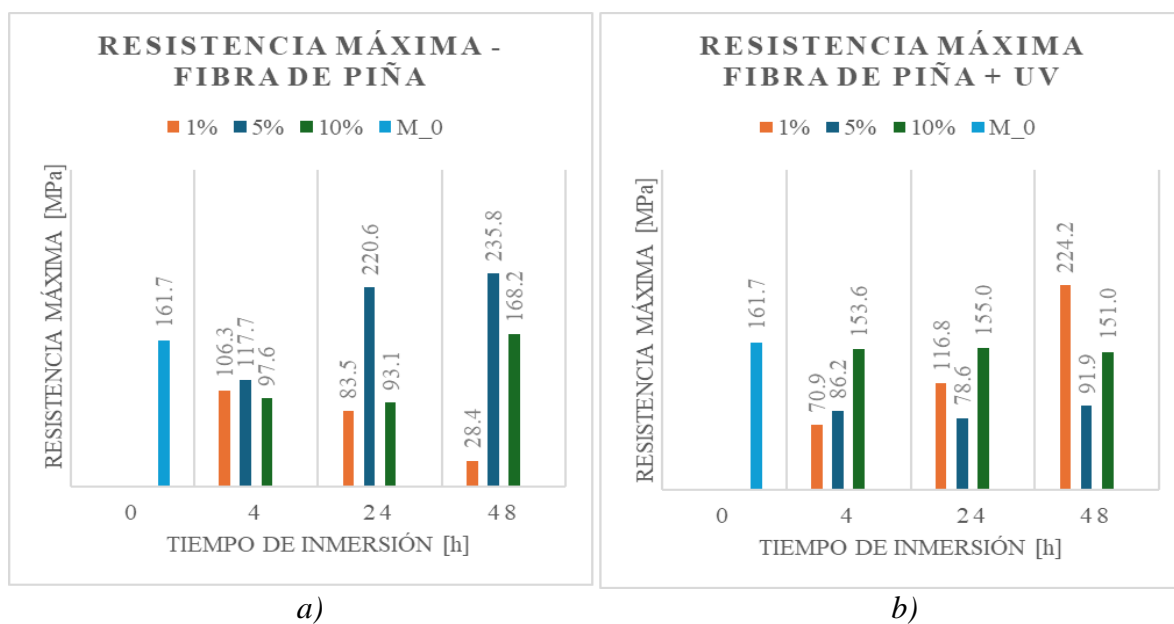
Por otro lado, la *figura 8a* revela un aumento de la resistencia máxima de la fibra de piña a medida que pasa el tiempo en inmersión con una solución al 5% p/p H₂O₂. Las

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

condiciones óptimas para maximizar la resistencia a la tracción de las fibras de piña se alcanzan al mantenerlas en inmersión durante 48 horas con una concentración del 5% de peróxido de hidrógeno expuestas al medio ambiente.

Figura 11.

Resistencia máxima para las Fibras de Piña Según la Concentración de H_2O_2 y el Tiempo de Inmersión



Nota: 1%, 5%, 10% son concentraciones p/p de H_2O_2 . b) M_0: fibra sin tratamiento

A su vez, se analizó el cambio en el módulo de elasticidad para las fibras de fique después de un tratamiento alcalino, que según (Munoz et al., 2014) está en un rango de 8.2 a 9.1 GPa, usualmente. En los resultados de nuestro proceso, en la *figura 12a* se registró valores por debajo de 8.2 GPa e incluso de la muestra sin tratamiento. Esto nos indicó que, ninguna de las concentraciones es adecuada para preservar dicha propiedad, lo que la vuelve muy flexible.

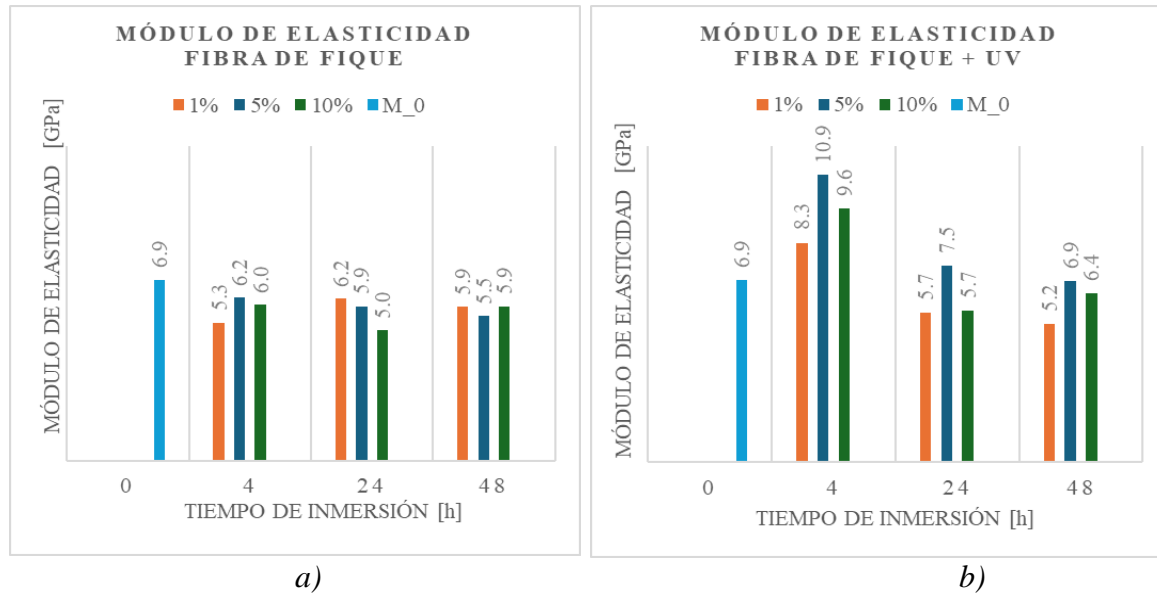
BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

Se observa un incremento en el módulo de elasticidad de las fibras de fique cuando se exponen a rayos UV durante las primeras 4 horas (*figura 12b*). Posteriormente, la exposición prolongada a UV afecta negativamente esta propiedad, reduciendo la rigidez de la fibra, aunque el cambio no es significativamente grande. La rigidez máxima se alcanza bajo condiciones de 5 % p/p de H_2O_2 de la solución durante 4 horas. En contraste, la fibra muestra mayor flexibilidad a las 48 horas con una concentración del 1 %, como se ilustra en la *figura 12b*.

Es importante destacar que la concentración de la solución acuosa en las fibras de fique, inmersas a condiciones ambientales (sin rayos UV) no tiene un impacto significativo en el módulo de elasticidad en términos de rigidez, como se observa en la *figura 12*, donde se registran solo pequeñas variaciones. Por lo tanto, estas condiciones son más efectivas para incrementar la flexibilidad de la fibra de fique, obteniendo que la fibra menos influenciada por el tratamiento a condiciones de 5% p/p de H_2O_2 tiene un módulo de elasticidad de 6.2 GPa, con una disminución de 0.7 GPa en comparación con la fibra original (muestra cero o sin tratamiento). Mientras que, la más flexible se obtiene a 10% durante 24 horas de inmersión en la solución acuosa (*figura 12a*).

Figura 12.

Módulo de Elasticidad para las Fibras de Fique Según la Concentración de H₂O₂ y el Tiempo de Inmersión



Nota: 1%, 5%, 10% son concentraciones p/p de H₂O₂. b) M_0: fibra sin tratamiento

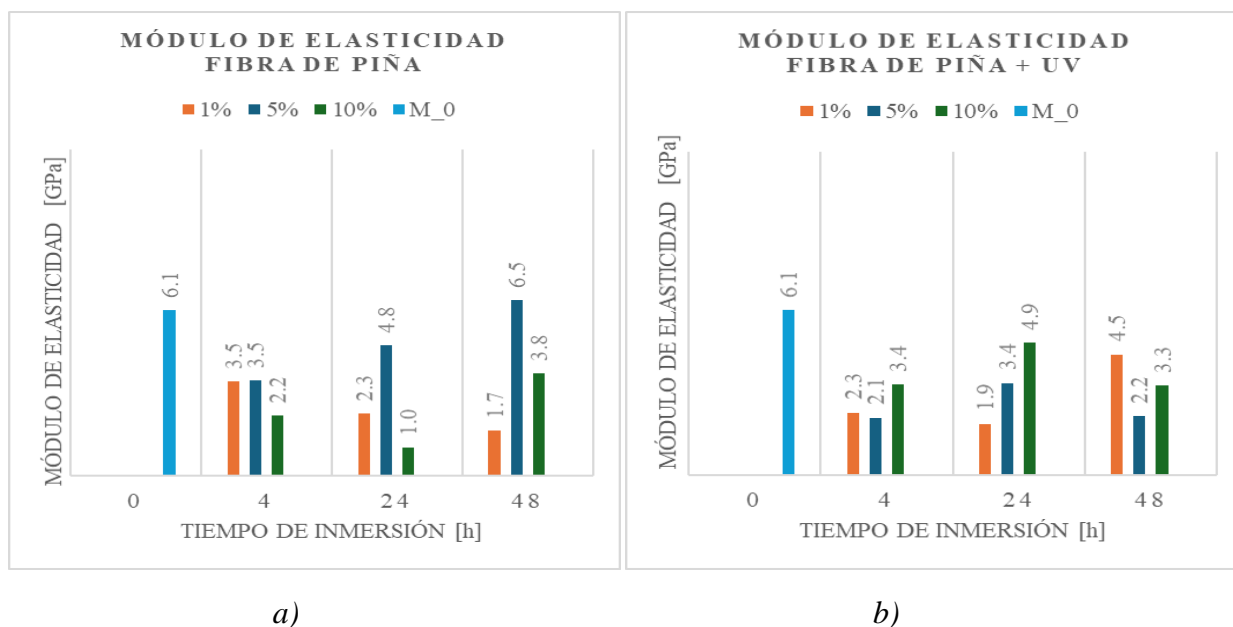
La *figura 13a* ilustra que para tener una fibra de piña más rígida que la muestra cero, se debe manejar condiciones al 5% de concentración a 48 horas, expuestas al medio ambiente. Así mismo, la fibra más flexible, se logra a 1 día de inmersión con la máxima concentración trabajada (10%). (Rojas et al., 2017) Esto significa que estas fibras son relativamente rígidas y tienen una buena capacidad para resistir deformaciones cuando se les aplica una fuerza. El rango de módulo de elasticidad para las artesanías varía de 2 a 10 Gpa, según (Rojas et al., 2017) y es una medida de la resistencia de un material a la deformación elástica; cuanto más alto es el valor, más rígido es el material.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

En la *figura 13b* se observa que la incidencia de radiación UV aumenta el módulo de elasticidad al 10% p/p H₂O₂ con respecto a la *figura 13a* a las mismas condiciones. Mientras que, si se expone el tratamiento a medio ambiente, con 10% p/p y 48 horas de inmersión, la rigidez va a aumentar con respecto a la fibra sin tratamiento.

Figura 13.

Módulo de elasticidad para las Fibras de Piña Según la Concentración de H₂O₂ y el Tiempo de Inmersión



Nota: 1%, 5%, 10% son concentraciones p/p de H₂O₂. b) M_0: fibra sin tratamiento

5.3 Escalado planta piloto

A continuación, se presentan las tablas (*Tabla 1* y *2*) con las propiedades de las fibras obtenidas en las etapas anteriores, con el fin de determinar las condiciones más efectivas en términos de porcentaje de blanqueamiento y resistencia máxima para llevarlas a escala piloto.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

En las fibras de fique, se alcanza un blanqueo máximo de 92.6% sin UV y de 91.3% con UV, con una resistencia máxima de 226 MPa y 200.2 MPa respectivamente. Esta resistencia es menor en comparación con la muestra cero, que tiene un valor de 229 MPa (*Tabla 1*). A pesar de esta reducción en la resistencia, la muestra 13 de fique sin UV muestra un alto nivel de blanqueo sin afectar de manera significativa la resistencia de la fibra, pero se somete a consideración que, al ser un tratamiento a una concentración del 10%, sus costos e materia prima sean más elevados que los demás. Por el contrario, la muestra 10 de fique sin UV, con tratamiento al 5%, presenta un nivel de blanqueo (89.9%) cercano al de la muestra 13, con menores costos de materia prima y mayor resistencia (255.1 MPa).

Tabla 1.

Porcentaje de Blanqueamiento y Propiedades de las Fibras de Fique y Fique + UV

Concentración %p/p	Muestra	FIQUE			FIQUE + UV		
		% Blanqueo	Resistencia máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	% Blanq ueo	Resistencia máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
0%	0	52.3	229.0	6.9	52.3	229.0	6.9
	3	79.9	199.6	5.3	82.1	291.1	8.3
1%	4	80.3	270.8	6.2	85.9	213.3	5.7
	5	89.3	310.6	5.9	88.3	174.7	5.2
5%	8	84.7	215.5	6.2	89.6	301.4	10.9
	9	87.7	267.4	5.9	89.5	195.1	7.5
	10	89.9	255.1	5.5	91.3	200.2	6.9
10%	13	92.6	226.0	6.0	90.6	296.3	9.6
	14	92.5	190.1	5.0	90.2	165.7	5.7
	15	87.3	232.9	5.9	90.8	180.2	6.4

Por otro lado, en las fibras de piña sin UV se logra un blanqueamiento máximo de 90.1% y de 94.9% con UV, con resistencias máximas de 235.8 MPa y 155 MPa, respectivamente como se muestra en la *Tabla 2*, evidenciando que así como tiene un alto % de blanqueo, la muestra 10 tiene la mayor resistencia a la tracción de todos los tratamientos

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

de la fibra de piña, indicando que este tratamiento favorece tanto la resistencia como el blanqueo, a su vez, disminuyendo los costos de materia prima, al tener una concentración del 5% p/p de H₂O₂.

Tabla 2.

% de Blanqueo y Propiedades de las Fibras de Piña y Piña + UV

Concentración %p/p	Muestra	PIÑA			PIÑA + UV		
		% Blanqueo	Resistencia máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	% Blanqueo	Resistencia máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
0%	0	57.3	161.7	6.1	57.3	161.7	6.1
	3	76.7	106.3	3.5	75.8	70.9	2.3
1%	4	85.0	83.5	2.3	89.3	116.8	1.9
	5	84.5	28.4	1.7	89.0	224.2	4.5
5%	8	80.3	117.7	3.5	83.0	86.2	2.1
	9	87.7	220.6	4.8	89.3	78.6	3.4
	10	90.1	235.8	6.5	91.9	91.9	2.2
10%	13	83.3	97.6	2.2	78.9	153.6	3.4
	14	88.2	93.1	1.0	94.9	155.0	4.9
	15	83.3	168.2	3.8	89.1	151.0	3.3

Asimismo, se observa que algunas muestras superan la resistencia máxima de la muestra cero, ya que se ha comprobado que el H₂O₂ mejora las propiedades físico-mecánicas de la fibra blanqueada (Motta Candela, 1988). Los datos obtenidos experimentalmente de resistencia máxima y módulo de elasticidad para el fique se ajustan al rango proporcionado de la literatura (Daza Moreno & Garzón Moyano, 2023) como se muestra en la *Tabla 3*. En cambio, para las fibras de piña se ajusta en el límite superior, pero no en el límite inferior del rango, esto debido a la irregularidad de los hilos de fibra de piña, los cuales variaban en su grosor abruptamente debido a que no tenían un proceso de hilado controlado, sino que eran hilados a mano.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Tabla 3.**

Comparativa de Propiedades Mecánicas de las Fibras Obtenidas en la Literatura y Experimentalmente.

Fibras	Resistencia máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]
Fique exp.	(190.1-310.6)	(5.0-6.9)
Fique literatura	(219.9-507.1)	(3.3-8.7)
Piña exp.	(28.4-235.8)	(1.0-6.5)
Piña literatura	(252.7-463.1)	(2.8-11.8)

Teniendo en cuenta el análisis anterior, se seleccionaron como condiciones iniciales para la etapa 3, los tratamientos para las fibras de fique y piña a una concentración de H₂O₂ al 5% p/p durante 48 horas, los cuales se usaron para reproducir el proceso a escala piloto con una capacidad de tratamiento de 1kg tanto para fibras de fique como de piña. Estas fibras estaban compuestas por hilos y mechones peinados y despeinados.

Una vez blanqueadas las fibras como se muestra en la *Figura 14*, se eligieron dos muestras al azar, para su posterior prensado y medición de blancura, arrojando como resultado para mechones peinados y despeinados, un promedio de 97.5% de blanqueo para la fibra de fique, y un 87.4% de blanqueo para la fibra de piña, evidenciándose un cambio en el blanqueo de estas fibras a escala piloto (*Tabla 4*).

Tabla 4.

% de Blanqueo a Escala Piloto y Laboratorio

<i>% Blanqueo</i>		
Escala	Fique	Piña
Laboratorio (hilo)	89.9	90.1
Piloto (mechón)	97.5	87.6

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H_2O_2

Debido a esto, los resultados obtenidos variaron para hilos y mechones, aun sometidos al mismo tratamiento, arrojando niveles de blancura mayores para los mechones de la fibra de fique y menores para la fibra de piña en comparación con los obtenidos a escala laboratorio, puesto que el proceso a esta escala se realizó con hilos; de igual manera, se demostró que el % de blanqueo varía también con esta condición (hilos o mechones), por lo que se recomienda realizar el proceso de blanqueamiento con la fibra en forma de mechones y no de hilo.

Figura 14.

Fibras de Piña y Fique sin Tratamiento y con Tratamiento de Blanqueo a Escala Piloto



6 Conclusiones

- Se logra identificar las condiciones que permiten alcanzar un nivel de blancura mayor al 80%. Los tratamientos de las fibras con soluciones acuosas concentradas a partir de 1% p/p de H₂O₂; tiempos de inmersión de más de 2 horas y exposición a radiación UV o al medio ambiente.
- La exposición a radiación ultravioleta (UV) es promotora de las interacciones que permiten el blanqueamiento; sin embargo, en el caso de las fibras de piña, la incidencia de rayos UV provoca un incremento en la flexibilidad con una reducción en el módulo de elasticidad en las pruebas experimentales realizadas. En contraste, las fibras de fique presentan un incremento en el módulo de elasticidad, indicando una mayor rigidez del material, por ende, la fibra bajo estrés tendrá una deformación elástica menor.

Por otro lado, el tratamiento para las fibras de piña durante 48 horas en inmersión con una concentración del 5% p/p de agente blanqueante, expuestas al medio ambiente mejora significativamente la resistencia de las fibras. En el caso de las fibras de fique, hay una gran influencia en la resistencia máxima aumentando en las primeras 4 horas al exponerlas a radiación UV.
- El nivel de blancura obtenido para 1 kg de fibra depende de la blancura de la muestra cero y si son hilos gruesos, delgados, fibra peinada o despeinada. Los mejores resultados se obtuvieron para la fibra peinada, por lo que se recomienda realizar el blanqueamiento antes de hilar la fibra, sobre los mechones peinados.

Referencias bibliográficas

- Artesanías de Colombia. (2018). *Manual para la tintura de fibras naturales (Celulosicas y proteinicas) (Curvas de procesos) con tintes industriales*. Obtenido de <https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/bitstream/001/5574/3/INST-D%202018.%2011>
- Artesanías de Colombia. (2023). *Artesanías de Colombia*. Obtenido de https://artesantiasdecolombia.com.co/PortalAC/GlosarioPalabra/fique_206
- Asim, M., Jawaid, M., Abdan, K., & Ishak, M. R. (2016). Effect of Alkali and Silane Treatments on Mechanical and Fibre-matrix Bond. *Journal of Bionic Engineering*.
- Bagnato, V. e. (2018). Colorimetric of cotton textile bleaching through H₂O₂ activated by UV light. *Universidad de Sao Paulo*.
- Biorreactors.net. (2015). *Biorreactors.net*.
- Blanco M.L., M. R. (1991). *Pulpeo de cabuya*. Costa Rica: Revista semestral de ingeniería, Universidad de Costa Rica.
- Bolio, G., Catañeda, R., Córdova, S., García, S., Falconi, R., Rincón, J., . . . Valerio, C. (2019). Blanqueo de la fibra de celulosa de paja de caña de azúcar (*Saccharum spp*) con peróxido de Hidrógeno. *Revista agroproductividad*.
- Cordero, C., Ortiz, D., & Paredes, O. (2021). *Respuesta del fique (Furcraea macrophylla) a diferentes ambientes lumínicos y métodos de fraccionamiento de fertilizantes*. Colombia: Centro de investigación Molotilonia.
- Daza Moreno, M. C., & Garzón Moyano, J. A. (2023). *Caracterización de las propiedades mecánicas según la norma ASTM D3822 de las fibras de piña coco y fique sometidas a tensión en la máquina Tribolab del laboratorio de metalografía de la Universidad Industrial de Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Delgado, K. J. (2021). *Estrategias y desarrollo de la exportación de la piña Oro Miel producida en Lebrija Santander hacia mercados internacionales*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/38494/2021DelgadoKelly.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dipshika, H., Nabaneeta, G., Seiko, J., Robin, D., & Gautam, B. (2017). Exploration of future prospects of Indian pineapple leaf, an agro waste for textile application, *Journal of Cleaner Production*. Volume 141.
- Eliceiri, K., Rasband, W., & Schneider, C. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 671-675.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

- España Espinoza, J. (2019). Las fibras vegetales: materiales ancestrales para un futuro sostenible en el desarrollo de productos. 17.
- Espinosa, J. M. (2020). *Las fibras vegetales: materiales ancestrales para un futuro sostenible en el desarrollo de productos.* . Ciudad autónoma de Buenos Aires: Artículo del centro de estudios en diseño y comunicación. .
- Flores Rúa, E., Giraldo Borja, M., Orcón Basilio, B., & Ynca Berrospi, A. (2019). 5. Alternativas de pretratamiento textil: método integrado de descruce-blanqueo y blanqueo químico-enzimático, evaluación y comparación con el método clásico. *Revista de la sociedad química del Perú.*
- Gacén, J. G. (1969). Aspectos químicos del blanqueo de la lana con peróxido de hidrógeno: Modificación química de la queratina. *Instituto de investigación textil y cooperación industrial*, 28.
- Haque, A., Mojumdar, H., & Sazed Salman, K. (2014). *Effects of bleaching parameters on bursting strength and whiteness of cotton knitted fabric.* Bangladesh: Department of textile engineering.
- Ibérica, P. (s.f.). *PCE INSTRUMENTS*. Obtenido de https://www.pce-instruments.com/colombia/instrumento-medida/medidor/medidor-de-blancura-pce-instruments-medidor-de-blancura-pce-wsb-1-det_6207818.htm
- Ltd., S. (2018). *Direct Industry connect*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/specac-ltd/product-66059-1597095.html>
- Motta Candela, P. (1988). *Estudio técnico-económico de la sustitución de cloro por peróxido de hidrógeno en el blanqueo de pulpas obtenidas a partir de bagazo de caña.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Munoz, F., Velez, M., Hidalgo, A., Salazar, M., Herminsul, M., & Hernandez, J. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. *Rev.Bio.Agro*, 60-70.
- Namgoung, S. (2011). *Estudio y optimización del método tradicional de blanqueo comparando la efectividad con diferentes blanqueos de algodón.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Parra, A. C. (2020). *Extracción e incorporación de micropartículas de bagazo de fique en un material espumado obtenido a partir de almidón de yuca.* Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pérez Espinosa, H. (2015). *Catalasa para el manejo del peróxido de hidrógeno en la industria textil.* Santiago de Cali, Colombia: Universidad ICESI.
- Quing, L., Run, L., Huiyu, J., & Yuyang, Z. (2023). Efficient and sustainable bleaching of cotton/spandex integrating UVA radiation and peroxide activator: A study focus on

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂

the degradation mechanism of natural pigments in fibres. *Arabian Journal of Chemistry*.

Rayung, M., Ibrahim, N., Zainuddin, N., Saad, W., Razak, N., & Chieng, B. (2014). *The Effect of Fiber Bleaching Treatment on the Properties of Poly(lactic acid)/Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Composites*.

Rojas, M. R., Lee, K.-T. L., & Cortés, F. R. (2017). *Fibra de la hoja de piña, obtención y aplicaciones*. Universidad Nacional de Costa Rica.

Seol, N. (2011). Estudio y optimización del método tradicional de blanqueo comparando la efectividad con diferentes tratamientos de blanqueo de algodón. En *e blanqueo comparando la efectividad con diferentes tratamientos de blanqueo de algodón*. (págs. 30-49). Valencia.

Apéndice

Apéndice A.

% de blanqueo fibras de fique, concentración de H₂O₂, tiempo de inmersión y pH

<i>FIBRAS DE FIQUE</i>							
Muestra []	Tiempo [h]	Agua [ml]	H ₂ O ₂ [ml]	NaOH [g]	Na ₂ SiO ₃ [g]	pH	% Blanqueo
0	0						52.30
1	1						73.65
2	2						79.15
3	4	200	4	0.971	3.886	11.0	81.05
4	24						83.87
5	48						86.97
6	1						84.62
7	2						86.62
8	4	182	18.2	0.953	3.813	10.2	87.78
9	24						91.78
10	48						92.62
11	1						83.85
12	2						87.90
13	4	167.5	33.5	0.957	3.829	9.8	91.78
14	24						92.25
15	48						91.33

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Apéndice B.**

Tabla de % blanqueo fibras de fique+UV, concentración de H₂O₂, tiempo de inmersión y pH

<i>FIBRAS DE FIQUE + UV</i>								
Muestra	[]	Tiempo [h]	Agua [ml]	H₂O₂ [ml]	NaOH [g]	Na₂SiO₃ [g]	pH	% Blanqueo
0		0						52.30
1		1						73.22
2		2						75.88
3	1%	4	200	4	0.971	3.886	11.0	77.32
4		24						80.82
5		48						90.28
6		1						80.85
7		2						84.68
8	5%	4	182	18.2	0.953	3.813	10.2	88.42
9		24						85.22
10		48						87.90
11		1						84.55
12		2						82.85
13	10%	4	167.5	33.5	0.957	3.829	9.7	89.20
14		24						87.03
15		48						91.23

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂*Apéndice C.**Tabla de % Blanqueo Fibras de Piña, Concentración de H₂O₂, Tiempo de Inmersión y pH*

<i>FIBRAS DE PIÑA</i>								
Muestra	[]	Tiempo [h]	Agua [ml]	H₂O₂ [ml]	NaOH [g]	Na₂SiO₃ [g]	pH	% Blanqueo
0		0						57.30
1		1						76.18
2		2						75.03
3	1%	4	200	4	0.971	3.886	11.1	73.88
4		24						85.77
5		48						87.48
6		1						75.98
7		2						71.13
8	5%	4	182	18.2	0.953	3.813	10.3	83.23
9		24						87.72
10		48						90.80
11		1						71.12
12		2						70.50
13	10%	4	167.5	33.5	0.957	3.829	10.0	84.10
14		24						79.52
15		48						84.72

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Apéndice D.**

Tabla de % Blanqueo Fibras de Piña+UV, Concentración de H₂O₂, Tiempo de Inmersión y pH

<i>FIBRAS DE PIÑA + UV</i>							
Muestra	[]	Tiempo [h]	Agua [ml]	H₂O₂ [ml]	NaOH [g]	Na₂SiO₃ [g]	pH % Blanqueo
0		0					57.30
1		1					80.32
2		2					78.90
3	1%	4	200	4	0.971	3.886	77.80
4		24					93.10
5		48					91.32
6		1					83.32
7		2					80.32
8	5%	4	182	18.2	0.953	3.813	80.43
9		24					90.50
10		48					93.23
11		1					71.18
12		2					76.02
13	10%	4	167.5	33.5	0.957	3.829	75.55
14		24					96.80
15		48					90.60

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂*Apéndice E.**Tabla de Repetición de Experimentos Fique y Fique +UV*

Muestra	FIQUE					FIQUE+UV				
	% Blanqueo					% Blanqueo				
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Promedio	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Promedio
3	81.05	86.70	77.50	74.30	79.89	77.32	82.60	83.50	84.90	82.08
4	83.87	79.60	76.10	81.60	80.29	80.82	89.20	84.90	88.70	85.90
5	86.97	89.90	90.10	90.40	89.34	90.28	85.70	86.90	90.30	88.30
8	87.78	89.40	77.70	84.00	84.72	88.42	90.30	93.30	86.40	89.60
9	91.78	86.50	87.20	85.40	87.72	85.22	86.40	95.90	90.60	89.53
10	92.62	91.50	84.20	91.10	89.85	87.90	91.80	91.80	93.50	91.25
13	91.78	95.70	93.50	89.60	92.65	89.20	91.40	91.10	90.70	90.60
14	92.25	95.10	95.20	87.60	92.54	87.03	91.90	89.50	92.50	90.23
15	91.33	83.50	83.30	91.10	87.31	91.23	94.40	92.40	85.10	90.78

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂*Apéndice F.**Repetición Experimentos Piña y Piña + UV*

Muestra	PIÑA					PIÑA+UV				
	% Blanqueo					% Blanqueo				
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Promedio	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Promedio
3	73.88	82.40	69.70	80.70	76.67	77.80	75.00	74.20	76.10	75.78
4	85.77	84.20	87.30	82.80	85.02	93.10	85.00	89.00	90.00	89.28
5	87.48	84.70	84.00	81.90	84.52	91.32	87.30	88.30	88.90	88.95
8	83.23	82.40	80.40	75.10	80.28	80.43	86.80	79.80	84.90	82.98
9	87.72	87.60	92.70	82.80	87.70	90.50	91.00	86.50	89.10	89.28
10	90.80	91.70	91.50	86.40	90.10	93.23	92.80	90.60	91.10	91.93
13	84.10	83.40	89.00	76.60	83.28	75.55	85.60	77.10	77.40	78.91
14	79.52	94.80	85.80	92.50	88.15	96.80	93.50	94.20	95.00	94.88
15	84.72	83.70	83.00	81.90	83.33	90.60	88.80	87.90	89,8	89.10

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Apéndice G.***Desviación Estándar en Medición del % Blancura con el medidor de Blancura Portátil**GLTL para las Fibras de Fique y Fique + UV*

Muestra	<i>FIBRAS DE FIQUE</i>		<i>FIBRAS DE FIQUE + UV</i>	
	% Blanqueo promedio	Desviación estándar	% Blanqueo promedio	Desviación estándar
0	52.30	-	52.30	-
1	73.65	0.84	73.22	0.70
2	79.15	0.71	75.88	0.15
3	81.05	1.06	77.32	0.38
4	83.87	1.15	80.82	1.32
5	86.97	1.84	90.28	0.51
6	84.62	0.59	80.85	0.84
7	86.62	0.90	84.68	1.13
8	87.78	0.53	88.42	1.49
9	91.78	1.17	85.22	0.94
10	92.62	1.58	87.90	0.55
11	83.85	0.10	84.55	0.56
12	87.90	0.13	82.85	1.39
13	91.78	0.96	89.20	1.14
14	92.25	1.12	87.03	1.78
15	91.33	0.59	91.23	1.57

Nota: Los valores de la desviación estándar son bajos, por lo que los datos son confiables.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Apéndice H.***Desviación Estándar en Medición del % Blancura con el Medidor de Blancura Portátil**GLTL para las Fibras de Piña y Piña + UV*

Muestra	<i>FIBRAS DE PIÑA</i>		<i>FIBRAS DE PIÑA + UV</i>	
	% Blanqueo promedio	Desviación estándar	% Blanqueo promedio	Desviación estándar
0	57.30	-	57.30	-
1	76.18	2.11	80.32	0.90
2	75.03	0.63	78.90	0.73
3	73.88	1.25	77.80	0.37
4	85.77	1.42	93.10	0.45
5	87.48	0.73	91.32	1.30
6	75.98	0.74	83.32	0.92
7	71.13	1.42	80.32	1.53
8	83.23	0.83	80.43	1.45
9	87.72	0.95	90.50	1.00
10	90.80	1.64	93.23	0.89
11	71.12	1.18	71.18	0.29
12	70.50	1.06	76.02	0.84
13	84.10	0.58	75.55	0.45
14	79.52	1.49	96.80	0.88
15	84.72	0.37	90.60	1.16

Nota: Los valores de la desviación estándar son bajos, por lo que los datos son confiables.

BLANQUEAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE Y PIÑA CON H₂O₂**Apéndice I.***Área Promedio de Sección Transversal de Fibras de Fique y Desviación Estándar*

<i>FIQUE Y FIQUE+UV</i>			
<i>Muestras</i>	<i>Área FIJI [mm²]</i>	<i>Área prom. [mm²]</i>	<i>Desviación estándar</i>
F+UV 9	0.537		
F+UV 15	0.746		
F+UV 3	0.821	0.868	0.354
F 0	1.368		
F 4	0.787		
F 8	1.004		
F 13	0.913	0.94525	0.125
F 0	1.077		

Apéndice J.*Área Promedio de Sección Transversal de Fibras de Piña y Desviación Estándar*

<i>PIÑA Y PIÑA+UV</i>				
<i>Muestras</i>	<i>Área FIJI [mm²]</i>	<i>Área prom. [mm²]</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Grupo</i>
P 3	0.324			
P3	0.385			
P+UV 3	1.052	0.560	0.334	GRUESO: P8
P13	0.478			
P 14	0.187			
P 5	0.287			
P 10	0.219	0.274	0.095	DELGADO: P+UV 9, P+UV14
P 9	0.401			
P+UV 15	0.404			
P+UV 4	0.625			
P+UV 8	0.357	0.462	0.117	MEDIO: P4, P15, P+UV10, P+UV13
P+UV 5	0.462			
P 0	0.339			
P 0	0.457	0.398	0.083	DELGADO