ISSN 2477-9105
Número 33 Vol.1 (2025)
DOI: https://doi.org/10.47187/perf.v1i33.317
Perfiles
Fecha de recepción: 17-10-2024 · Fecha de aceptación: 15-12-2024 · Fecha de Publicación: 13-03-2024

EXTRACCIÓN DE FIBRAS DE CELULOSA DEL TALLO DE CÁÑAMO (*Cannabis sativa L.*) MEDIANTE TRATAMIENTO QUÍMICO PARA SU APLICACIÓN TEXTIL

Extraction of cellulose fibers from hemp stalk (*Cannabis sativa* L.) by chemical treatment for textile application

[1] Hugo Solís García *
[1] Brenda Serrano Iguasnia
[1] Andrés De la Rosa Martínez
[1] Diego Montesdeoca Espín
[1] Stalin Suntaxi Crisanto
[1] Kathia Cifuentes Benavides
[2] David Gonzalez Benitez
[3] Gabriela Gualpás Castillo

[1] Univerdad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito, Ecuador.

[2] Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agricolas, Quito, Ecuador.

[3] Universidad de Especialidades Turísticas UDET, Gestión Medioambiental, Quito, Ecuador.

* hfsolis@uce.edu.ec

RESUMEN

Las fibras de celulosa naturales presentan propiedades ideales para el desarrollo de materiales innovadores, por su sostenibilidad, renovabilidad y bajo costo de producción. Este estudio tiene como objetivo obtener fibras de celulosa a partir del líber de la planta de cáñamo industrial mediante hidrólisis alcalina oxidativa seguida de hidrólisis ácida. Se determinaron las condiciones óptimas para maximizar el contenido de alfa-celulosa mediante caracterización química. La biomasa se sometió a un proceso de descripción física, análisis inmediato y pretratamiento alcalino para obtener el porcentaje medio de corteza aprovechable (56,07 ± 0,002) %. Se realizó un diseño experimental para la concentración de álcali (NaOH: 2 - 10 % p/v), tiempo (30 - 120 minutos) y las condiciones de hidrólisis ácida. Las fibras obtenidas se sometieron a una evaluación física de rendimiento, color y liberación de fibra. Se caracterizaron químicamente mediante análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la composición lignocelulósica y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para confirmar la eliminación del material lignínico a través de los grupos funcionales de las fibras de cáñamo. El análisis estadístico reveló que las condiciones óptimas fueron 10% de NaOH y 120 minutos de hidrólisis alcalina, obteniendo un contenido de alfa-celulosa del 75,11 ± 1,08%.

Palabras claves: *Fibra de cáñamo, Hidrólisis alcalina, Nuevos materiales textiles, Contenido en alfa-celulosa.*

ABSTRACT

Natural cellulose fibers exhibit ideal properties for the development of innovative materials due to their sustainability, renewability, and low production cost. This study aims to obtain cellulose fibers from the bast of industrial hemp through oxidative alkaline hydrolysis followed by acid hydrolysis. The optimal conditions for maximizing alpha-cellulose content were determined through chemical characterization. The biomass underwent physical description, proximate analysis, and alkaline pretreatment to obtain the average percentage of usable bark (56.07 ± 0.002) %. An experimental design was conducted to evaluate alkali concentration (NaOH: 2–10% w/v), treatment time (30–120 min), and acid hydrolysis conditions. The obtained fibers were subjected to a physical evaluation of yield, color, and fiber release. Chemical characterization was performed using thermogravimetric analysis (TGA) to determine lignocellulosic composition and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to confirm lignin removal through the functional groups of hemp fibers. Statistical analysis revealed that the optimal treatment conditions were 10% NaOH and 120 minutes of alkaline hydrolysis, resulting in an average alpha-cellulose content of 75.11 ± 1.08%.

Keywords: *Hemp fiber, Alkaline hydrolysis, new textile materials, Alpha-cellulose content.*

I. INTRODUCCIÓN

Los componentes de la planta del género Cannabis han sido ampliamente estudiados, lo que ha dado lugar a una importante inversión en investigación y desarrollo de patentes (1). El cáñamo es una de las variedades de la planta *Cannabis sativa* y se considera la primera planta cultivada para la producción de fibras (2). En el año 2020, la producción global de fibras textiles ascendió a 109,098 millones de kilogramos. De este total, el 70,4% correspondió a fibras sintéticas derivadas del petróleo, mientras que el 21,5% provino del algodón. Las fibras celulósicas de líber representaron el 7,1% de la producción, y la lana constituyó el 1% restante (3). Las fibras de cáñamo se encuentran entre las fibras celulósicas naturales más largas y potentes, con un bajo contenido en lignina (4).

Una fibra textil debe presentar propiedades fundamentales, como estructura fibrosa, hilabilidad, resistencia a la tracción y capacidad de teñido (5).En la actualidad, las fibras de cáñamo son reconocidas como el refuerzo más destacado para materiales compuestos debido a su carácter renovable, sostenible, biodegradable y no tóxico, además de su amplia disponibilidad y elevada resistencia específica. Su producción genera un menor impacto ambiental en comparación con otros materiales, ya que el cultivo de cáñamo demanda menos agua y pesticidas, al mismo tiempo que captura carbono durante su crecimiento, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono en múltiples aplicaciones industriales (6). Desde un enfoque ambiental, las fibras naturales representan una alternativa prometedora a las fibras sintéticas debido a sus destacadas propiedades, como su bajo costo, baja densidad, elevada resistencia mecánica, amplia disponibilidad, carácter ecológico, resistencia a la corrosión, facilidad de procesamiento y abundante presencia en el mercado (7).

En las últimas dos décadas, la fibra de cáñamo ha experimentado un crecimiento económico en el mercado europeo, impulsado por aplicaciones no convencionales, especialmente en la fabricación de una amplia variedad de productos de fibra prensada (8). Ha surgido una amplia gama de fibra prensada, productos aislantes y bioplásticos, con un éxito notable observado en las industrias automotriz, de la construcción y agrícola (9).

El tejido de cáñamo puede procesarse tan ligero y suave como el algodón. La fibra de cáñamo es muy duradera y mantiene su calidad durante mucho más tiempo que las prendas confeccionadas con otros tejidos (2,10).

El 24 de diciembre de 2019, la asamblea de Ecuador, por mayoría de votos, decidió despenalizar el cultivo y producción de cannabis en Ecuador con un contenido de THC menor al 1%, modificando el artículo 220 del Código Orgánico Integral Penal (COIP), que entró en vigor el 21 de junio de 2020. En mayo de 2020, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) señaló que esta modificación en el COIP habilita dos tipos de cultivo: el cáñamo industrial y el cannabis no psicoactivo, que presenta propiedades fenotípicas como el cannabis psicoactivo (11).

El cultivo mundial actual de fibras de cáñamo se destina principalmente a la industria textil, donde estas fibras pueden mostrar una mayor flexibilidad que el algodón (12). Sin embargo, uno de los retos más críticos y esenciales asociados a la fibra de cáñamo es la presencia de sustancias no celulósicas que pueden endurecerla y dificultar el procesamiento de la materia prima (13). Aunque el tallo es la fuente principal de fibras para aplicaciones textiles y otros productos, las hojas, brotes y flores también contienen compuestos valiosos que podrían ser utilizados en otras industrias, como la farmacéutica, la alimentaria o la cosmética (14).

La fibra de celulosa de cáñamo se emplea en la producción de prendas de vestir debido a su resistencia, durabilidad, capacidad de absorción y excelente resistencia a la radiación UV. Con frecuencia se mezcla con algodón (15). El cáñamo industrial es un cultivo altamente eficiente, capaz de generar, en promedio tres veces más toneladas métricas de fibra por hectárea cultivada en comparación con otros cultivos (15). Por lo tanto, el uso del cáñamo permite reducir los costos agrícolas en un 77,63 % en comparación con el algodón, lo que se traduce en un menor costo total promedio para esta actividad (16).

La eliminación de las gomas cementantes presentes en la corteza del líber facilita la individualización y el enriquecimiento de fibras en celulosa. Las pectinas, la hemicelulosa y la lignina pueden ser removidas mediante diversos métodos de desgomado (16), que pueden ser: microbiológico (17), enzimático (18), explosión de vapor (8) y tratamiento químico (19). Estos

procesos permiten la separación de fibras ricas en celulosa; sin embargo, se requieren pasos adicionales de ablandamiento y refinado para preparar las fibras adecuadamente para la fabricación de hilados (20).

Del mismo modo, en Ecuador, hay un creciente interés en las aplicaciones potenciales del cáñamo industrial (8). Las fibras de celulosa se pueden extraer a través de diversos métodos, incluyendo tratamientos microbiológicos e hidrotérmicos (21).

A la fecha en Ecuador los estudios relacionados con fibras de cáñamo son: «Evaluación de tres variedades de cáñamo (*Cannabis sativa* L.) bajo tres densidades de siembra para la obtención de fibra» (22), y «Estudio de prefactibilidad para la creación de un estudio de factibilidad de cáñamo para la creación de una empresa productora y procesadora de fibra industrial de cáñamo en la provincia de Pichincha para la exportación al mercado alemán en el período 2019-2029» (23).

El objetivo de este trabajo es analizar un método de tratamiento químico que permita eliminar impurezas y gomas sin afectar la celulosa presente en las fibras, con el propósito de utilizarlas en la industria textil como fibras de alta calidad (24,25). La eliminación de las gomas que unen la corteza del líber facilita la separación y el enriquecimiento de las fibras de celulosa. Sin embargo, aunque estos procesos permiten obtener fibras con alto contenido de celulosa, se requieren etapas adicionales de ablandamiento y refinamiento para su conversión en hilos (24).

Las fibras provenientes de nuevas matrices serán el futuro de las materias primas no sólo para la industria textil, sino también para los modernos compuestos ecológicos utilizados en diversas áreas de aplicación, como materiales de construcción, tableros de partículas, paneles aislantes, alimentos, nutrición, cosméticos ecológicos, productos farmacéuticos y como fuente de otros biopolímeros, química fina y energía (26). Las fibras de cáñamo presentan un gran potencial en la industria textil, siendo utilizadas en prendas de vestir, vaqueros, ropa deportiva, bolsos, sombreros, fundas de cojines, mantas, calzado, calcetines, accesorios, cuerdas, hilos, alfombras, muebles y otros enseres domésticos. Estos productos pueden igualar o incluso superar las propiedades de otras matrices de fibra (27). La producción y procesamiento de cáñamo para la extracción de celulosa pueden generar empleo en áreas rurales, en particular en el cultivo, la cosecha y el procesamiento de la planta (26). Esto puede ser beneficioso para las economías locales, especialmente en regiones con alto potencial agrícola, además El cáñamo proporciona una variedad de productos derivados, como fibra para textiles, papel, bioplásticos y biocombustibles. Esta diversidad favorece la expansión económica de la industria, creando nuevas fuentes de ingresos y fortaleciendo la estabilidad financiera de los productores (21).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La cuantificación de celulosa, hemicelulosa y lignina en las fibras se realizó mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (PERKIN ELMER 97575), permitiendo identificar las modificaciones en la fibra de cáñamo tras el tratamiento. Para evaluar los cambios de masa inducidos por el tratamiento térmico en un ambiente controlado, se empleó análisis termogravimétrico (METTLER TOLEDO 4787110). Los ensayos requirieron aproximadamente 10 kg de tallos de cáñamo en base seca, con tonalidades que variaban entre marrón verdoso y marrón claro, así como diferentes tamaños, para su procesamiento en el tratamiento químico.

Caracterización de la materia prima

La materia prima utilizada en este estudio proviene de cultivos destinados a aplicaciones medicinales. Por ello, las variables relacionadas con el crecimiento, la cosecha y el manejo postcosecha no fueron optimizadas para la extracción de fibra de celulosa (1). El enfoque de este trabajo está dirigido al aprovechamiento de las fibras debido a su relevancia en la industria textil y su potencial como materia prima sostenible. A diferencia de las aplicaciones medicinales, que requieren un control estricto de variables botánicas, de cosecha y postcosecha, el procesamiento de fibras permite una mayor flexibilidad en las condiciones de cultivo y manejo, facilitando su investigación y desarrollo (5). Esto explica las características físicas no uniformes de la variedad de *Cannabis sativa* L. denominada Latitud Cero. Los tallos recolectados, con una coloración marrón verdosa o marrón clara, corresponden a plantas con un rango de edad de 10 a 16 semanas de crecimiento. Durante este período, las plantas alcanzan una altura y densidad de tallo que

resultan adecuadas para la extracción de fibras de alta calidad, características esenciales para el aprovechamiento en la industria textil.

Se realizó un análisis físico cualitativo y cuantitativo para determinar las características de los tallos de cannabis como color, longitud y diámetro. Además, se realizó un pretratamiento químico para preparar la biomasa y facilitar la separación del núcleo leñoso de la corteza (8). Para ello, se cortaron los tallos por los nudos, se sumergieron en una solución de NaOH (0,35% p/v) durante 90 minutos a temperatura de ebullición, se lavaron para eliminar la mayor parte de las impurezas, las microfibras y la estopa, y se secaron durante 8 horas a 50 °C. Se aplicó hidrólisis oxidativa alcalina a concentraciones del 10% y 2% de hidróxido de sodio (NaOH) durante 120 minutos. El análisis TGA determinó los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina en las fibras. Además, el análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) detectó grupos funcionales característicos del material lignocelulósico.

Existen varios tipos de tratamientos, como el mecánico, el enzimático, el biológico y el químico (28). Este estudio se centró en los efectos del tratamiento químico de los álcalis para obtener fibra enriquecida con celulosa mediante la eliminación de la lignina en tratamientos químicos. Se combinaron los siguientes factores: concentración de álcali, agente oxidante en la solución alcalina, tiempo y temperatura del tratamiento alcalino, pH de la fibra, temperatura de secado, condiciones de hidrólisis ácida y contenido de alfa celulosa.

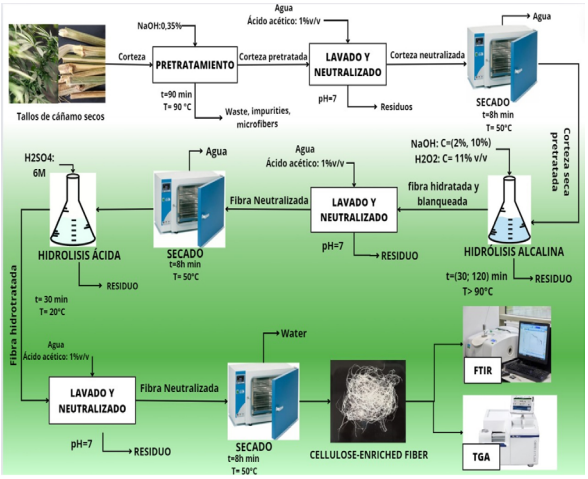


Figura 1. *Diagrama de flujo del proceso de obtención de fibras de cáñamo enriquecidas con celulosa*

Tratamiento Químico

La biomasa pretratada se sometió a hidrólisis alcalina con NaOH al 2% p/v y al 10% p/v a temperaturas de 90, 92 y 94 °C con un agente oxidante, en este caso agua oxigenada (H_2O_2: 11% v/v: pH 10-11) durante 30 y 120 minutos a la temperatura de ebullición de la solución. Posteriormente, se lavó y neutralizó con ácido acético (1% v/v) hasta alcanzar un pH casi neutro. Después, se secaron las fibras a 50°C durante 8 horas. Las fibras secas se pesaron y se colocaron en un baño de licor (1:20) de solución ácida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) 6M durante 30 minutos a temperatura ambiente. A continuación, se volvieron a lavar con agua destilada y se secaron en las mismas condiciones. Finalmente, se determinó el contenido de alfa-celulosa en las fibras mediante análisis termogravimétrico, clasificándolas en α_1 y α_2, que representan bajo y alto, respectivamente.

Evaluación de la fibra tratada químicamente

La evaluación cualitativa se basó en el color y el desprendimiento de las fibras obtenidas, mientras que el rendimiento del tratamiento químico se centró en el porcentaje de pérdida de peso. El análisis TGA permite determinar los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina en las fibras. Además, se empleó el análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para detectar los grupos funcionales característicos del material lignocelulósico como se muestra en la Figura 1.

III. RESULTADOS

Las características físicas para la biomasa utilizada de Cannabis sativa L. (cáñamo) se resumen en la Tabla 1.

Descripción	Observación
Especies vegetales	*Cannabis sativa* L. (Cáñamo) -variedad Latitud Cero.
Número de tallos	23
Color de la corteza de los tallos	Marrón y verdoso
Rango del diámetro [cm]	[0,8 – 2,5]
Rango de la longitud [cm]	[55 - 87]
Aspecto del tallo	La corteza está seca, así que fue fácil despegarla de los tallos

Tabla 1. *Caracterización física de la materia prima.*

Se aplicó pretratamiento alcalino para la limpieza y separación de la corteza del núcleo leñoso. Someter los tallos secos directamente a un baño 1:50 de solución (NaOH, 0,35%p/v) ocasiona un gasto significativo de reactivos y un bajo porcentaje de corteza obtenida, alrededor del 7,58%; como detalla la Tabla 2.

Tabla 2. *Porcentaje de corteza en los tallos de cáñamo sin pretratamiento*

Muestra	Masa inicial [g]	Tiempo [min]	Relación NaOH	Cantidad NaOH 0.35% [mL]	Masa Final [g]	%Corteza
Corteza	40,5948	90	1:50	2028	3,0750	7,58%

Por esta razón, se retiró la corteza de forma mecánica para posteriormente realizar el pretratamiento y se obtuvo un *%Corteza* de 56,07± 0,002 %.

La Tabla 3 registra los datos recolectados para el cálculo del porcentaje de corteza obtenida después del pretramiento realizado.

Tabla 3. *Porcentaje de corteza en los tallos de cáñamo.*

Muestra	Masa inicial [g]	Tiempo [min]	Relación NaOH	Cantidad NaOH 0.35% [mL]	Masa Final [g]	%Corteza
Corteza 1	5,0203	90	1:50	251	3,2615	64,97%
Corteza 2	6,8025	90	1:50	340	3,4712	51,03%
Corteza 3	4,1912	90	1:50	210	2,2335	53,29%
Corteza 4	4,7405	90	1:50	237	2,5238	53,24%
Corteza 5	9,6333	90	1:50	482	5,5714	57,83%
%Corteza						56,07%
σ%Corteza						0,002%

Según Arcos (29) la eficacia de cada tratamiento puede determinarse mediante el porcentaje de pérdida de masa registrado durante el proceso químico para la obtención de fibras de celulosa. La Tabla 4 presenta la cuantificación de pérdida de masa.

Tabla 4. *Porcentaje de pérdida de masa en cada punto experimental.*

Tratamiento	Réplica 1			Réplica 2		
	Mic [g]	Mf [g]	%Pmi	Mic [g]	Mf [g]	%Pmi
A_1B_1	1,0029	0,7522	24,99%	1,0879	0,8263	24,05%
A_2B_1	1,0406	0,6317	39,29%	1,0765	0,6930	35,63%
A_1B_2	1,0899	0,6898	36,71%	1,0185	0,6773	33,50%
A_2B_2	1,0395	0,4929	52,59%	1,0156	0,4570	55,01%

***Mic** = Masa corteza inicial, **Mf** = Masa corteza final, **%Pmi** = Pérdida de masa,
* A=concentración de NaOH % p/v; **A_1**= 2%, **A_2**= 10%

* **B**= tiempo de ensayo **B1**=30 min; **B2**=120min

En la Figura 2 se representa los resultados promedios de la pérdida de masa de las fibras de cáñamo por eliminación del material no fibroso en función del tiempo de hidrólisis alcalina.

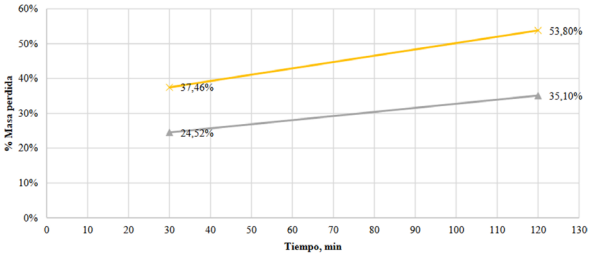


Figura 2. *Pérdida de masa de la fibra en función del tiempo.*

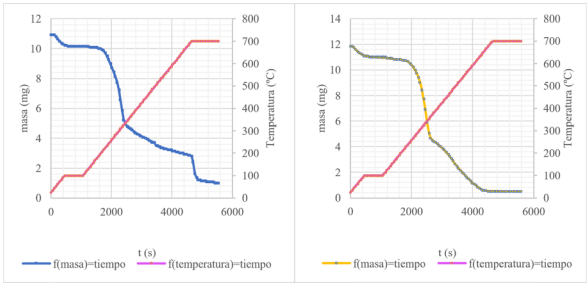
Los resultados del análisis inmediato de la corteza cruda y pretratada se muestran en la Tabla 5, estos valores fueron calculados mediante los resultados del análisis TGA.

Tabla 5. *Análisis inmediato en base seca de las cortezas de Cannabis sativa L*

Muestra	%Humedad	%V	%Carbón Fijo	%Ceniza
Biomasa inicial	7,05	61,54	22,14	9,27
Corteza pretratada	7,32	75,51	13,05	4,12

%V = Material volátil

Los diagramas de la Figura 3 representan la degradación térmica que experimenta la corteza de cáñamo sin pretratamiento y con el pretratamiento a diferentes tiempos.



a) b)

Figura 3. *Pérdida de masa en función del tiempo. Donde a) corteza de cáñamo sin pretratamiento, b) corteza pretratada.*

La Tabla 6 detalla los rangos de temperatura considerados para obtener el área bajo la curva DTG y calcular los resultados se detallan en la Tabla 7 donde el porcentaje de celulosa en la corteza inicial es 37,53% que corresponde al pico predominante de los termogramas DTG entre (260 – 363) ºC, 13,17% de hemicelulosa en (100 – 260) ºC y 10,85% de lignina en (363 – 525) ºC como se representa en la Figura 4.

Tabla 6. *Áreas de descomposición térmica de la corteza de cáñamo sin tratar*

Componente	Ti (ºC)	Tf (ºC)	Área
Agua	25	100	0,12360
Hemicelulosa	100	260	0,23977
Celulosa	260	363	0,68296
Lignina	363	525	0,19728
Carbón fijo	525	700	0,12471

***Ti**= Temperatura Inicial
***Tf**= Temperatura Final

Tabla 7. *Cuantificación del material lignocelulósico de la corteza sin tratar.*

Componente	A_i	A/A_v	%V	%Comp
Hemicelulosa	0,23977	0,2141	61,54	13,17%
Celulosa	0,68296	0,6097	61,54	37,53%
Lignina	0,19728	0,1762	61,54	10,85%
Área Total (Av)	1,12011			

%Comp: Porcentaje del componente lignocelulósico. **** Ai :*** Área bajo la curva del componente lignocelulósico. ****Av :*** Área total de componentes volátiles. %***V***: Porcentaje de componentes volátiles.

La Figura 4 muestra cinco zonas correspondientes a la descomposición térmica de la corteza de cáñamo sin tratamiento. En el área 1 ocurre la evaporación de agua 25 – 100 ºC, el área 2 comprende a la zona de degradación de la hemicelulosa 100 – 260 ºC, el área 3 corresponde a la zona de degradación de la celulosa 260 – 363 ºC, el área 4 corresponde a la lignina 363 – 525 ºC y desde el área 5 observa una degradación térmica más lenta, misma que se considera la degradación del carbón fijo 525 – 700 ºC.

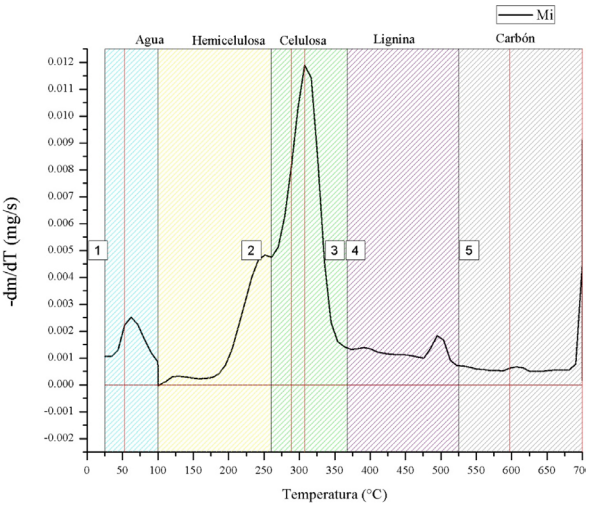


Figura 4. *Rendimiento de fibra obtenido mediante tratamiento químico.*

Mediante la Tabla 8 se puede observar el porcentaje promedio de hemicelulosa con su respectiva desviación estándar, así como también los datos de las réplicas realizadas.

Tabla 8. *Cuantificación de hemicelulosa de las fibras de celulosa.*

	Muestra	%V	Ai	Avi	Hemi (%)
Replica 1	A1 B1	71,29%	0,02857	1,00885	2,02%
	A2 B1	81,09%	0,04770	1,75067	2,21%
	A1 B2	75,23%	0,02873	1,32079	1,64%
	A2 B2	78,04%	0,02285	1,68988	1,06%
Replica 2	A1 B1	73,68%	0,05893	1,57494	2,76%
	A2 B1	77,21%	0,02122	1,38879	1,18%
	A1 B2	76,35%	0,05408	1,39611	2,96%
	A2 B2	79,40%	0,02007	1,44603	1,10%

Experimento	$\overline{\%Hem} \pm \sigma_{\%Hem}$ (%)
A1B1	2,39 ± 0,52
A2B1	1,70 ± 0,73
A1B2	2,30 ± 0,93
A2B2	1,08 ± 0,03

* A=concentración de NaOH % p/v; **A_1**= 2%, **A_2**= 10%

* **B**= tiempo de ensayo **B1**=30 min; **B2**=120min

La Tabla 9 presenta los valores de rendimiento porcentual de alfa celulosa correspondientes a las réplicas 1 y 2 de cada tratamiento A y B, y. Por su parte, la Tabla 10 muestra el porcentaje del rendimiento porcentual par a la lignina.

Tabla 9. *Cuantificación de α-celulosa.*

	Muestra	%V	Ai	Avi	α- celulosa (%)
Prueba 1	A1 B1	71,29%	0,93568	1,00885	66,12%
	A2 B1	81,09%	1,55511	1,75067	72,04%
	A1 B2	75,23%	1,23916	1,32079	70,58%
	A2 B2	78,04%	1,60983	1,68988	74,34%
Prueba 2	A1 B1	73,68%	1,44121	1,57494	67,42%
	A2 B1	77,21%	1,30713	1,38879	72,67%
	A1 B2	76,35%	1,27631	1,39611	69,80%
	A2 B2	79,40%	1,38172	1,44603	75,87%

Experimento	$\overline{\%Cel} \pm \sigma_{\%Cel}$ (%)
A1B1	69,77 ± 0,92
A2B1	72,36 ± 0,45
A1B2	70,19 ± 0,55
A2B2	75,11 ± 1,08

* A=concentración de NaOH % p/v; **A_1**= 2%, **A_2**= 10%

* **B**= tiempo de ensayo **B1**=30 min; **B2**=120min

Tabla 10. *Cuantificación de lignina de las fibras de celulosa.*

	Muestra		%V	Ai	Av	Lignina (%)
Replica 1	A1	B1	71,29%	0,04460	1,00885	3,15%
	A2	B1	81,09%	0,14786	1,75067	6,85%
	A1	B2	75,23%	0,05290	1,32079	3,01%
	A2	B2	78,04%	0,05720	1,68988	2,64%
Replica 2	A1	B1	73,68%	0,07480	1,57494	3,50%
	A2	B1	77,21%	0,06044	1,38879	3,36%
	A1	B2	76,35%	0,06572	1,39611	3,59%
	A2	B2	79,40%	0,04424	1,44603	2,43%

Experimento	$\overline{\%Lig} \pm \sigma_{\%Lig}$ (%)
A1B1	3,33 ± 0,25
A2B1	5,11 ± 2,47
A1B2	3,30 ± 0,41
A2B2	2,54 ± 0,15

* A=concentración de NaOH % p/v; **A_1**= 2%, **A_2**= 10%
* **B**= tiempo de ensayo **B1**=30 min; **B2**=120min

En la Tabla 11 se aprecia la cantidad de fibra extraída (Mf) y la cantidad de biomasa inicial (Mi) que al relacionarlas nos dan el rendimiento de la fibra químicamente tratada.

Tabla 11. *Rendimiento de la fibra extraída en el tratamiento químico.*

	Factores		Muestra	Mi	Mf	%R
	C. NaOH (%p/v)	Tiempo (min)		(g)	(g)	(%)
Réplica 1	2	30	$A_1 B_1$	0,2556	0,1917	75,01%
	10	30	$A_2 B_1$	0,3163	0,1920	60,71%
	2	120	$A_1 B_2$	0,2977	0,1884	63,29%
	10	120	$A_2 B_2$	0,3824	0,1813	47,41%
Réplica 2	2	30	$A_1 B_1$	0,2582	0,1961	75,95%
	10	30	$A_2 B_1$	0,3031	0,1951	64,37%
	2	120	$A_1 B_2$	0,2826	0,1879	66,50%
	10	120	$A_2 B_2$	0,4012	0,1805	44,99%

Experimento	$\overline{\%R} \pm \sigma_{\%R}$ (%)
$A_1 B_1$	75,48 ± 0,67
$A_2 B_1$	62,54 ± 2,59
$A_1 B_2$	64,90 ± 2,27
$A_2 B_2$	46,20 ± 1,71

* A=concentración de NaOH % p/v; **A_1**= 2%, **A_2**= 10%
* **B**= tiempo de ensayo **B1**=30 min; **B2**=120min

El análisis estadístico ANOVA aplicado para la obtención de α-celulosa evidencia el nivel de significancia de los factores concentración (A) y tiempo de ensayo (B), además de su interacción conjunta, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. *ANOVA para obtención de α-celulosa.*

FV	SC	GL	CM	F_0	Valor – p
A	0,00550	1	0,005503	87,730594	0,0007237
B	0,00191	1	0,001906	30,390030	0,0052839
AB	0,00002	1	0,000022	0,355053	0,5833461
Error	0,00025	4	0,000063		
Total	0,00768	7			

La Figura 5 muestra los contornos de superficie de respuesta estimada donde se tiene el tiempo en función de la concentración para el porcentaje de obtención de α – Celulosa.

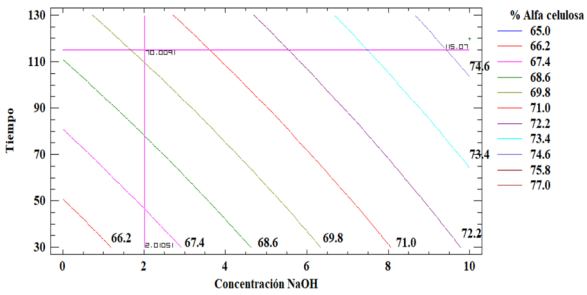


Figura 5. *Contornos de superficie de respuesta estimada*

La Tabla 13 muestra la asignación de las bandas de frecuencia en las que se encuentran los picos de absorción de los grupos funcionales más comunes para la fibra de cáñamo.

Tabla 13. *Bandas características de los espectros mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de la biomasa bruta (Mi) y pretratada (Mp).*

Vibración	Fuente	Mi		Mp	
		N. wave (cm-1)	Abs.	N. wave (cm-1)	Abs.
O-H voltaje	**Celulosa, Hemicelulosa**	**3301**	**0,008375**	**3336**	**0,022367**
Tensión simétrica C-H	Celulosa, Hemicelulosa	2917	0,019542	2916	0,027288
Tensión C=O	Pectinas and resinas	1754	0,008153	1732	0,007800
Oscilación de agua absorbida O-H	Agua	1634	0,018000	1630	0,016193
Tensión simétrica del grupo aromático C=C	Lignina	1516	0,013049	1507	0,011453
Inclinación en el plano H-C-H and O-C-H	Celulosa	1423	0,014035	1422	0,022871

Inclinación en el plano de C-H	Celulosa, Hemicelulosa	1369	0,013721	1372	0,022048
CH2 oscilación	Celulosa	1317	0,013856	1313	0,025765
Tensión en el Anillo aromático y C=O	Lignina	1239	0,016103	1241	0,019588
Tensión simétrica C-O-C	Celulosa, Hemicelulosa	1140	0,018952	1154	0,034187
Vibración en los grupos de los anillos C-C, C-OH, C-H	Celulosa, Hemicelulosa	1092	0,026872	1045	0,075308
		1019	0,036165	1019	0,084125
Deformación y estiramiento		961	0,025442	998	0,078366
Vibración de los grupos de anillos C-C, C-OH, C-H	Celulosa	874	0,019406	894	0,038911
Deformación y estiramiento	Celulosa	633	0,040768	660	0,064543

IV. DISCUSIÓN

La cuantificación química del material lignocelulósico se realizó mediante el análisis termogravimétrico (TGA) tanto para la biomasa inicial como para las fibras obtenidas. Los resultados se expresaron en términos de masa en función del tiempo. En la Tabla 6 se detallan los rangos de temperatura considerados para obtener el área bajo la curva DTG de la biomasa pretratada, y los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 7. En estos, se observa que el porcentaje de celulosa en la corteza inicial es de 37,53%, lo que corresponde al pico predominante en el termograma DTG en el rango de 260 a 363 °C.

Además, se identificó un 13,17% de hemicelulosa en el rango de 100 a 260 °C y un 10,85% de lignina en el intervalo de 363 a 525 °C, como se ilustra en la Figura 4. La lignina, un polímero altamente aromático con una notable estabilidad térmica, puede retardar la degradación de la celulosa, como se ha indicado en estudios previos (30).

Para obtener un alto porcentaje de corteza en el pretramiento químico (56,07%), se retiró de forma manual la corteza del tallo debido a que si se lo hacía mediante el método alcalino de Bredemann (31) los porcentajes bajaban significativamente (7,58%) como se observa en la Tabla 2.

Es relevante considerar cómo la temperatura y los métodos de pretratamiento afectan las características de las fibras, lo que podría aportar mayor comprensión sobre su comportamiento en diferentes procesos industriales.

El método detallado por Hajiha (32) y Carrier (33) para el análisis termogravimétrico (TGA) indica que, durante la etapa isotérmica a 100 °C por 10 minutos, ocurre la evaporación del agua presente en la biomasa, un proceso que se desarrolla entre 0 y 1000 segundos dentro del rango de temperaturas de 20 a 100 °C como se observa en la Figura 3, dando un resultado de una humedad de la corteza sin tratamiento y pretratada de 7,05% y 7,32%, respectivamente.

Siguiendo el proceso de calentamiento en el TGA se produce la descomposición de los polímeros lignocelulósicos en el rango de tiempo de 1000 a 3600 segundos y temperaturas de 100 a 525 °C, esta pérdida significativa de masa puede llegar a representar el 75,51% en la corteza pretratada. En la segunda etapa isotérmica de 525 a 700 °C por 3600 a 5600 segundos en atmósfera oxidante produce las pérdidas de carbón fijo, que pueden ascender hasta un 13,05% en la corteza pretratada. En la etapa final los valores de la masa residual del análisis TGA son considerados como cenizas, donde la corteza pretratada puede llegar a obtener un 4,12% como se muestra en la Tabla 5. Determinar la materia volátil es importante porque indica la facilidad de combustibilidad de la biomasa, los altos contenidos de materia volátil en la biomasa muestran facilidad de procesamiento (34).

El proceso de extracción de fibra de celulosa mediante tratamiento químico se eligió debido a su capacidad para eliminar de manera controlada los materiales cementantes de la corteza del líber pretratada, lo que resulta en una fibra homogénea de mayor calidad, a diferencia de los tratamientos biológicos (35). Como se observa en la Figura 2, las experimentaciones con concentraciones del 2% y 10% de hidróxido de sodio a un tiempo de 120 minutos mostraron una mayor pérdida de masa, lo que indica que la pérdida es proporcional al tiempo de tratamiento. Este comportamiento sugiere que el tiempo

de exposición es un factor clave en la eficiencia del tratamiento químico, ya que un tiempo más largo aumenta la eliminación de los materiales cementantes y, por ende, la degradación de la fibra. Sin embargo, a concentraciones más altas (18%), el proceso parece provocar una mayor destrucción de las fibras, lo que limita la calidad y la integridad estructural de las fibras extraídas. Este hallazgo resalta la importancia de optimizar tanto la concentración como el tiempo de tratamiento para obtener una fibra de celulosa de calidad sin comprometer su resistencia.

La cuantificación química del material lignocelulósico se realizó mediante el análisis termogravimétrico (TGA) tanto para la biomasa inicial como para las fibras obtenidas. Los resultados se expresaron en términos de masa en función del tiempo. En la Tabla 6 se detallan los rangos de temperatura considerados para obtener el área bajo la curva DTG de la biomasa pretratada, y los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 7. En estos, se observa que el porcentaje de celulosa en la corteza inicial es de 37,53%, lo que corresponde al pico predominante en los termogramas DTG en el rango de 260 a 363 °C. Además, se identificó un 13,17% de hemicelulosa en el rango de 100 a 260 °C y un 10,85% de lignina en el intervalo de 363 a 525 °C, como se ilustra en la Figura 4. La lignina, un polímero altamente aromático con una notable estabilidad térmica, puede retardar la degradación de la celulosa, como se ha indicado en estudios previos (30). El pico de hemicelulosa se solapa con el pico de celulosa, pero se considera su degradación térmica en el rango de 100 a 260 °C. La Tabla 9 muestra el porcentaje promedio de α – celulosa obtenida en cada ensayo realizado, donde el tratamiento A2B2 evidencia y valor promedio más alto de 75,11 ± 1,08 %. Las Tablas 8 y 10 registran los porcentajes promedios de hemicelulosa y lignina respectivamente obtenidos durante cada ensayo, de la misma manera las fibras que presentan menor cantidad de estos polímeros corresponden a los ensayos A2B2 con 1,08 ± 0,03 % hemicelulosa y 2,54 ± 0,15 % de lignina.

Por otro lado, el rendimiento se determinó mediante el método gravimétrico después de realizar el tratamiento químico correspondiente a cada muestra para evaluar la cantidad de fibra obtenida en cada ensayo, la Tabla 11 registra los valores del rendimiento promedio porcentual para cada muestra, donde se tiene que para A1B1 el rendimiento promedio es del 75,48 ± 0,67 % y para A2B2 el 46,20 ± 1,71 %, con un porcentaje de α – celulosa de 69,77 ± 0,92 % y 75,11 ± 1,08 %, respectivamente. Un alto rendimiento de fibra obtenida no significa que las fibras contengan un porcentaje promedio de α – celulosa alto.

En cuanto a la estadística de los resultados para α – celulosa se aprecia en la Tabla 12 que el factor que corresponde a la concentración de NaOH y el factor B que representa al Tiempo, tienen un valor – p menor a 0,05, es decir, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Por lo tanto, se establece que los dos factores influyen significativamente en la variable de respuesta, que es el porcentaje de obtención de α – celulosa. La interacción AB tiene un valor – p mayor a 0,05, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula para dicha interacción, lo que significa la interacción entre la concentración de hidróxido de sodio y el tiempo no son influyentes sobre el porcentaje de α – celulosa obtenida.

Las condiciones óptimas del proceso de obtención de α – celulosa corresponden a la combinación de los niveles altos de los factores (10% NaOH y 120 min) que maximiza el porcentaje promedio de obtención a 75,11 ± 1,08 %, sin embargo, según Manaia (23) explica que el porcentaje de α – celulosa en las fibras naturales de cáñamo suele estar en el rango de 70 - 74%, si el valor mínimo de α – celulosa que se necesita es del 70% se puede optimizar las variables al 2% de NaOH y 115 minutos como se aprecia en la Figura 5, optimizando la concentración de reactivo utilizado y el tiempo de tratamiento.

Finalmente, para el análisis cualitativo de grupos funcionales en FTIR se basó en la investigación de Dai & Fan (36) donde asignan bandas de frecuencia en el cual se encuentran los máximos de absorción de los grupos funcionales comunes para la fibra del cáñamo. La Tabla 12, correspondiente a la materia prima sin tratamiento registran que existen una tensión del grupo C=O correspondiente a las pectinas y resinas, la banda aparece en 1754 cm^{-1} y una absorción de 0,0018, en las muestras tratadas químicamente se puede observar una menor banda de absorción, lo que significa que existe eliminación de cantidad de pectinas, ceras y resinas durante la hidrólisis. Otro espectro importante se encuentra en las bandas de absorción de 1516 y 1239 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones características de los grupos funcionales de la lignina C=C y C=O, respectivamente.

V. CONCLUSIONES

El tratamiento químico demostró ser un método eficiente para obtener fibras de cáñamo natural enriquecidas con celulosa mediante la eliminación de material cementante no celulósico. En particular, la aplicación de un pretratamiento alcalino resultó crucial para separar la corteza del núcleo leñoso del líber y remover las impurezas presentes en la corteza, optimizando la calidad de las fibras obtenidas. El análisis FTIR confirmó la efectividad del proceso al evidenciar una disminución significativa en las bandas de absorción asociadas a los grupos funcionales de pectinas y ligninas, lo que indica su eliminación. Las condiciones óptimas para maximizar el contenido de α-celulosa (75,11 ± 1,08%) se lograron empleando una concentración de hidrólisis alcalina de 10% p/v NaOH y un tiempo de residencia de 120 minutos. El diseño experimental arrojó un porcentaje medio de α-celulosa del 71,31 ± 0,03% y un rendimiento de obtención del 99,04%.

Los residuos orgánicos generados durante el proceso de extracción de fibra, como las partes no aprovechables de la planta o los subproductos del tratamiento químico, deben ser gestionados adecuadamente. Estos residuos pueden ser compostados o utilizados en la producción de biogás.

Desde un enfoque de sostenibilidad, este método resulta factible debido al uso eficiente de recursos y su capacidad para generar fibras celulósicas de alta calidad en un tiempo y costo razonables, lo que respalda su viabilidad industrial. Sin embargo, para maximizar el rendimiento y la consistencia de las fibras, se recomienda optimizar las variables relacionadas con el cultivo y la postcosecha, así como emplear materias primas específicamente destinadas a la producción textil, minimizando así el impacto ambiental y garantizando la sostenibilidad del proceso.

VI. REFERENCIAS

1. Flores-Sanchez IJ, Ramos-Valdivia AC. A review from patents inspired by the genus Cannabis. Phytochem Rev [Internet]. 2017 Aug 16;16(4):639–75. Available from: http://link.springer.com/10.1007/s11101-016-9485-x
2. Smith T. Hempology 101: The History and Uses of Cannabis Sativa. 4th ed. Smith T, editor. Vol. 1. Victoria, Columbia, Canadá: International Hempology 101 Society; 2012. 110–160 p.
3. Castrillon N. Sostenibilidad en la producción y el consumo de fibras textiles. El Telégrafo [Internet]. 2021 [cited 2024 Apr 21]. p. 1–3. Available from: https://www.eltelegrafo.com/2021/05/sostenibilidad-en-la-produccion-y-el-consumo-de-fibras-textiles/
4. Bekiaris G, Koutrotsios G, Tarantilis PA, Pappas CS, Zervakis GI. FTIR assessment of compositional changes in lignocellulosic wastes during cultivation of Cyclocybe cylindracea mushrooms and use of chemometric models to predict production performance. J Mater Cycles Waste Manag [Internet]. 2020 Jul 11;22(4):1027–35. Available from: http://link.springer.com/10.1007/s10163-020-00995-7
5. Shuvo II. Fibre attributes and mapping the cultivar influence of different industrial cellulosic crops (cotton, hemp, flax, and canola) on textile properties. Bioresour Bioprocess [Internet]. 2020 Dec 26;7(1):51–64. Available from: https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-020-00339-1
6. Crini G, Lichtfouse E, Chanet G, Morin-Crini N. Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review. Environ Chem Lett [Internet]. 2020 Sep 8;18(5):1451–76. Available from: https://link.springer.com/10.1007/s10311-020-01029-2
7. Johnson R. Hemp as an Agricultural Commodity. Congressional Research Service [Internet]. 2018 Jun 22;7–11. Available from: https://sgp.fas.org/crs/misc/RL32725.pdf
8. Dreyer J, Müssig J, Koschke N, Ibenthal WD, Harig H. Comparison of Enzymatically Separated

Hemp and Nettle Fibre to Chemically Separated and Steam Exploded Hemp Fibre. J Ind Hemp [Internet]. 2002 Jan;7(1):43–59. Available from: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1300/J237v07n01_05

9. Chernova TE, Mikshina PV, Salnikov VV, Ibragimova NN, Sautkina OV, Gorshkova TA. Development of distinct cell wall layers both in primary and secondary phloem fibers of hemp (Cannabis sativa L.). Ind Crops Prod [Internet]. 2018 Jul;117:97–109. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669018302036

10. Neves ACC, Rohen LA, Mantovani DP, Carvalho JPRG, Vieira CMF, Lopes FPD, et al. Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. J Mater Res Technol [Internet]. 2020 Mar;9(2):1296–304. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785419305708

11. Gallegos H. Aplicaciones de cáñamo como alternativa rentable a la reactivación económica de Ecuador tras la pandemia de COVID-19. Perfiles [Internet]. 2021 Jun 30;1(25):45–53. Available from: https://perfiles.espoch.edu.ec/index.php/perfiles/article/view/112

12. Amode NS, Jeetah P. Paper production from Mauritian hemp fibres. Waste Biomass Valor [Internet]. 2021 Apr 18;12(4):1781–802. Available from: https://link.springer.com/10.1007/s12649-020-01125-y

13. Rana SS, Gupta MK. Isolation of nanocellulose from hemp (Cannabis sativa) fibers by chemo-mechanical method and its characterization. Polym Compos [Internet]. 2020 Dec 21;41(12):5257–68. Available from: https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.25791

14. Duque Schumacher AG, Pequito S, Pazour J. Industrial hemp fiber: A sustainable and economical alternative to cotton. J Clean Prod [Internet]. 2020 Sep;268:1221–80. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620322277

15. Placet V, Day A, Beaugrand J. The influence of unintended field retting on the physicochemical and mechanical properties of industrial hemp bast fibres. J Mater Sci [Internet]. 2017 May 1;52(10):5759–77. Available from: http://link.springer.com/10.1007/s10853-017-0811-5

16. Jiménez Muñoz E, Prieto-García F, Prieto Méndez J, Acevedo Sandoval OA, Rodríguez Laguna R. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. Dyna (Medellín) [Internet]. 2016 Jun 30;83(197):232–80. Available from: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/52243

17. Calderón Rojas C. Utilización de la fibra de cáñamo en la industria textil: Una nueva opción para la problemática de los cultivos ilícitos en Colombia. [Tesis de Ingeniería]. Bogotá: Universidad de los Andes; 2003 [cited 2024 Jun 18]. Available from: http://hdl.handle.net/1992/14014

18. Allegret S. The history of hemp. In: Bouloc P, Allegret S, Arnaud L, editors. Hemp: industrial production and uses [Internet]. UK: CABI Plant Protection Series; 2013. p. 4–26. Available from: http://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781845937935.0000

19. Kostic M, Pejic B, Skundric P. Quality of chemically modified hemp fibers. Bioresour Technol [Internet]. 2008 Jan;99(1):94–9. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852406006419

20. López D. Elaboración artesanal de hilo de la fibra de formio (Phormium tenax) [Tesis de Ingeniería]. Quito: Escuela Politécnica Nacional; 2012.

21. Chandra RP, Chu Q, Hu J, Zhong N, Lin M, Lee JS, et al. The influence of lignin on steam pretreatment and mechanical pulping of poplar to achieve high sugar recovery and ease of enzymatic hydrolysis. Bioresour Technol [Internet]. 2016 Jan;199:135–41. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852415012900

22. Manaia JP, Manaia AT, Rodriges L. Industrial Hemp Fibers: An Overview. Fibers [Internet]. 2019 Dec 2;7(12):106–18. Available from: https://www.mdpi.com/2079-6439/7/12/106

23. Pino O. Estudio de pre factibilidad para la creación de una empresa productora y procesadora de fibra de cáñamo industrial en la provincia de Pichincha para la exportación al mercado Alemán en

el período 2019-2029 [Tesis de Licenciatura]. [Quito]: Pontificia Universidad Católica del Ecuador; 2019.

24. Xanthopoulou E, Chrysafi I, Polychronidis P, Zamboulis A, Bikiaris DN. Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites. Journal of Composites Science [Internet]. 2023 Apr 4;7(4):138–43. Available from: https://www.mdpi.com/2504-477X/7/4/138
25. Fike J. Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop. CRC Crit Rev Plant Sci [Internet]. 2016 Nov 1;35(5–6):406–24. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352689.2016.1257842
26. Rasera GB, Ohara A, de Castro RJS. Innovative and emerging applications of cannabis in food and beverage products: From an illicit drug to a potential ingredient for health promotion. Trends Food Sci Technol [Internet]. 2021 Sep;115:31–41. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092422442100409X
27. Gedik G, Avinc O. Bleaching of Hemp (Cannabis Sativa L.) Fibers with Peracetic Acid for Textiles Industry Purposes. Fibers and Polymers [Internet]. 2018 Jan 1;19(1):82–93. Available from: http://link.springer.com/10.1007/s12221-018-7165-0
28. Oliveira MAS, Pickering KL, Sunny T, Lin RJT. Treatment of hemp fibres for use in rotational moulding. Journal of Polymer Research [Internet]. 2021 Feb 20;28(2):53–78. Available from: https://link.springer.com/10.1007/s10965-021-02414-3
29. Arcos V. Desgomado de la fibra de Ramio (Boehmeria Nivea) mediante métodos químicos enzimáticos no tradicionales [Tesis de Ingeniería]. [Quito]: Universidad Politécnica Nacional; 2013.
30. Bleuze L, Lashermes G, Alavoine G, Recous S, Chabbert B. Tracking the dynamics of hemp dew retting under controlled environmental conditions. Ind Crops Prod [Internet]. 2018 Nov;123:55–63. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669018305636
31. Viscusi G, Barra G, Gorrasi G. Modification of hemp fibers through alkaline attack assisted by mechanical milling: effect of processing time on the morphology of the system. Cellulose [Internet]. 2020 Oct 25;27(15):8653–65. Available from: https://link.springer.com/10.1007/s10570-020-03406-0
32. de Meijer EPM, van der Werf HMG. Evaluation of current methods to estimate pulp yield of hemp. Ind Crops Prod [Internet]. 1994 Feb;2(2):111–20. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0926669094900922
33. Hajiha H, Sain M, Mei LH. Modification and Characterization of Hemp and Sisal Fibers. Journal of Natural Fibers [Internet]. 2014 Apr 3;11(2):144–68. Available from: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15440478.2013.861779
34. Carrier M, Loppinet-Serani A, Denux D, Lasnier JM, Ham-Pichavant F, Cansell F, et al. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. Biomass Bioenergy [Internet]. 2011 Jan;35(1):298–307. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953410003314
35. Ahmed A, Hidayat S, Abu Bakar MS, Azad AK, Sukri RS, Phusunti N. Thermochemical characterisation of Acacia auriculiformis tree parts via proximate, ultimate, TGA, DTG, calorific value and FTIR spectroscopy analyses to evaluate their potential as a biofuel resource. Biofuels [Internet]. 2021 Jan 2;12(1):9–20. Available from: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17597269.2018.1442663
36. Dai D, Fan M. Characteristic and Performance of Elementary Hemp Fibre. Materials Sciences and Applications [Internet]. 2010;01(06):336–42. Available from: http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/msa.2010.16049