UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña (*Ananas Comosus*) por el proceso de hidrólisis ácida.

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO(A) QUÍMICO(A)

AUTORES:

Bach. De la Cruz Bances Alex Daniel

Bach. Nuñez Arriola Carmela Elcina

ASESOR:

M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez – ORCID 0000-0002-2274-5543

LAMBAYEQUE-PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña (*Ananas Comosus*) por el proceso de hidrólisis ácida.

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO(A) QUÍMICO(A)

AUTORES:

Bach. De la Cruz Bances Alex Daniel

Bach. Nuñez Arriola Carmela Elcina

APROBADO POR:

Dr. Arce Cruzado Carlos Reinerio	**M.Sc. Tineo Huancas Rodolfo Pastor**
PRESIDENTE	**SECRETARIO**
M.Sc. Santamaría Baldera Gerardo	**M.Sc. Tirado Vásquez Julio Humberto**
VOCAL	**ASESOR**

236

ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2025

Siendo las 11:00 am del miércoles 29 de octubre del 2025, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulada: **Obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña *(Ananas Comosus)* por el proceso de hidrólisis ácida;** designados con *Res. N°194-2024-D-FIQIA de fecha 25 abril del 2024* y aprobada con *Res. N°661-2024-D-FIQIA de fecha 03 de diciembre del 2024*, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- ***Presidente:*** *Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado*
- ***Secretario:*** *M.Sc. Rodolfo Pastor Tineo Huancas*
- ***Vocal:*** *M.Sc. Gerardo Santamaria Baldera*

La tesis fue asesorada por el M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez, nombrado con *Res. N°437-2023-D-FIQIA-VIRTUAL de fecha 30 de diciembre del 2023.* El acto de sustentación es autorizado con Res. N°523-2025-D-FIQIA de fecha 22 de octubre del 2025.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: ***DE LA CRUZ BANCES ALEX DANIEL y NUÑEZ ARRIOLA CARMELA ELCINA; de la Escuela Profesional de Ingeniería Química*** y tuvo una duración de .60... minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de .16.. (Dieciseis.....) en la escala vigesimal, mención ..Bueno.....

Por lo que quedan APTO (A) (s) para obtener el Título Profesional de **INGENIERO (A) QUIMICO (A)** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Quimica e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las .12 p.m se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas

.....
Presidente
Dr. CARLOS REINERIO ARCE CRUZADO

.....
Secretario
M.Sc. RODOLFO PASTOR TINEO HUANCAS

.....
Vocal
M.Sc. GERARDO SANTAMARIA BALDERA

.....
Asesor
M.Sc. JULIO HUMBERTO TIRADO VASQUEZ

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo **JULIO HUMBERTO TIRADOVASQUEZ.** usuario revisor de la Tesis titulada: **"OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA A PARTIR DEL BAGAZO DE PIÑA (*ananas comosus*) POR EL PROCESO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA"**

Cuyo autor (es) son:

1.-Bach. De la Cruz Bances Alex Daniel

2.- Bach. Núñez Arriola Carmela Elcina

identificado (a) (os) (as) con documento de identidad: **72752618 y 72384303** ; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud 15.0%, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 07 de JUNIO del 2025

.....

Firma (Asesor)
Nombres y Apellidos: Julio Humberto Tirado Vásquez
DNI 16675190

Se Adjunta:
Resumen de Reporte automatizado de similitudes
Recibo digital

turnitin

Recibo digital

Este recibo confirma quesu trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Alex De La Cruz Bances
Título del ejercicio:	Quick Submit
Título de la entrega:	Obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña
Nombre del archivo:	(Anana… INFORME_FINAL-ADCB_CENA.docx
Tamaño del archivo:	16.72M
Total páginas:	114
Total de palabras:	18,277
Total de caracteres:	101,020
Fecha de entrega:	07-jun.-2025 08:10p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2694202413

UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) QUÍMICO(A)

AUTORES:

ASESOR:

LAMBAYEQUE-PERÚ
2024

M.Sc. Julio Tirado Vásquez

Derechos de autor 2025 Turnitin. Todos los derechos reservados.

Obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña (Ananas comosus) por el proceso de hidrólisis ácida.

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%	15%	2%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	dspace.espoch.edu.ec Fuente de Internet	9%
2	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	1%
3	pure.udem.edu.mx Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1%
5	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
6	1library.co Fuente de Internet	<1%
7	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
8	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	www.revista-agroproductividad.org Fuente de Internet	<1%
10	purl.org Fuente de Internet	<1%
11	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%
13	www.kerwa.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1%
14	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1%

M.Sc. Julio humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI: 16675190

15	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
20	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
21	helvia.uco.es Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad de Jaén Trabajo del estudiante	<1 %
23	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
25	cdigital.uv.mx Fuente de Internet	<1 %
26	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
27	www.systemcover.com Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	jornadas.fing.ucr.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
30	Submitted to Universidad TecMilenio Trabajo del estudiante	<1 %
31	www.raco.cat Fuente de Internet	<1 %

M.Sc. Julio Tirado Vásquez

DNI: 16675190

32	Submitted to Instituto Tecnologico de Costa Rica Trabajo del estudiante	<1 %
33	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	zaloamati.azc.uam.mx Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.tec.mx Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.umariana.edu.co Fuente de Internet	<1 %
38	rraae.cedia.edu.ec Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 15 words
Excluir bibliografía	Activo		

M.Sc. Julio Tirado Vásquez

DNI: 16675190

AGRADECIMIENTO

Agradecemos inmensamente a todos los que fueron parte de este proceso.

A nuestras familias, por estar siempre presentes y apoyarnos hasta el final, su dedicación y presencia son clave para que hayamos finalizado la tesis.

A nuestro asesor y jurados, por ayudarnos, resolver nuestras dudas y retroalimentar nuestro trabajo en cada ocasión.

Y al personal administrativo de la facultad y de laboratorio, por mejorar y facilitar el proceso de nuestra investigación.

DEDICATORIA

A mis padres, Noemi y Valeriano, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi fuente de inspiración en cada paso que he dado. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba.

A mis amigos y compañeros de camino, por su amistad, por los momentos de risas y por estar siempre presentes en los momentos de dificultad. Esta tesis también es suya.

Y, finalmente, a todos aquellos que me han impulsado a seguir adelante, me han ayudado a alcanzar esta meta.

Alex Daniel De la Cruz Bances

A mi familia, por estar pendiente de mí y enseñarme a no rendirme, en especial a mis padres, Isaías y Yaqueline, gracias a su motivación y apoyo.

A todas las personas que me han brindado sabiduría a lo largo de este camino, gracias a ello se ha logrado terminar con mucho aprendizaje de por medio.

Y a Fabricio Cruzate, la persona que ha estado conmigo desde el principio de este proyecto, ayudándome y acompañándome cada que fuese necesario, él ha sido mi soporte día a día.

Carmela Elcina Nuñez Arriola

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO 9

DEDICATORIA 10

ÍNDICE 11

ÍNDICE DE TABLAS 13

ÍNDICE DE FIGURAS 14

RESUMEN 15

ABSTRACT 16

I. INTRODUCCIÓN 17

II. DISEÑO TEÓRICO 19

2.1. ANTECEDENTES 19

III. BASES TEÓRICAS 22

IV. DISEÑO METODOLÓGICO 42

4.1 DISEÑO DE PROCEDIMIENTO A SEGUIR 42

4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA 44

4.2.1. Población 44

4.2.2. Muestra 45

4.2.3. Muestreo 46

4.3 TÉCNICAS, EQUIPOS Y MATERIALES 46

4.3.1 Técnicas 46

4.3.2 Materiales, equipos 46

4.4 AJUSTE METODOLÓGICO BASADO EN LA EXPERIMENTACIÓN 64

V. RESULTADOS Y DISCUSION 65

5.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA 65

5.1.1 Composición química 65

5.1.2 Apariencia de las fibras 67

5.2 CARACTERIZACIÓN DE CELULOSA 69

5.2.1 Extracción de celulosa 69

5.2.2 Análisis estadístico 71

5.2.3 Apariencia de las fibras de la celulosa extraída 74

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA OBTENIDA 75

5.3.1 Espectroscopía infrarroja 75

5.3.2 Apariencia de las fibras de nanocelulosa *78*
5.3.3 Apariencia *79*
5.3.4 Transmitancia de la nanocelulosa *81*
5.4 RESPUESTA A LOS OBJETIVOS PROPUESTOS 82
VI. CONCLUSIONES 87
VII. RECOMENDACIONES 89
VIII. BIBLIOGRAFÍA 91
IX. ANEXOS 102

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPUESTOS BIOACTIVOS DE LA PIÑA. 24
TABLA 2. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA APLICACIÓN 43
TABLA 3. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA APLICACIÓN. 44
TABLA 4. MOLIENDA Y TAMIZADO DEL BAGAZO DE PIÑA. 47
TABLA 5. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LA CELULOSA DEL BAGAZO DE PIÑA. 48
TABLA 6. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA NANOCELULOSA DEL BAGAZO DE PIÑA POR EL PROCESO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA. 50
TABLA 7. MÉTODO PARA DETERMINAR EL % DE HUMEDAD EN EL BAGAZO DE PIÑA 52
TABLA 8. MÉTODO PARA DETERMINAR EL % DE CENIZA EN EL BAGAZO DE PIÑA. 53
TABLA 9. MÉTODO PARA DETERMINAR EL % DE LIGNINA EN EL BAGAZO DE PIÑA. 54
TABLA 10. MÉTODO PARA DETERMINAR EL % DE SOLUBILIDAD DEL AGUA EN EL BAGAZO DE PIÑA 55
TABLA 11. MÉTODO PARA DETERMINAR EL % DE ALFA CELULOSA DEL BAGAZO DE PIÑA. 57
TABLA 12. MÉTODO PARA DETERMINAR LA TRANSMITANCIA DE LA NANOCELULOSA. 59
TABLA 13. MÉTODO PARA OBSERVAR LA ESTRUCTURA DE LAS MUESTRAS. 60
TABLA 14. MÉTODO PARA DETERMINAR GRUPOS FUNCIONALES CON ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO. 61
TABLA 15. PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM). 62
TABLA 16. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BAGAZO DE PIÑA. 65
TABLA 17. FACTORES USADOS PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DE CELULOSA Y CONTENIDO DE ALFA-CELULOSA 69
TABLA 18. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE CELULOSA A PARTIR DEL BAGAZO DE PIÑA. 70
TABLA 19. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CANTIDAD DE ALFA-CELULOSA PRESENTE EN LA CELULOSA EXTRAÍDA DEL BAGAZO DE PIÑA. 70
TABLA 20. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO DE LA CELULOSA EXTRAÍDA DEL BAGAZO DE PIÑA 72
TABLA 21. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL PORCENTAJE DE CONTENIDO DE ALFA CELULOSA DE LA CELULOSA EXTRAÍDA 73
TABLA 22. TRANSMITANCIA DE LA NANOCELULOSA POR HIDRÓLISIS ÁCIDA A 62 Y 70% CON ULTRASONIDO. 81
TABLA 23. DATOS QUE RESPALDAN Y CARACTERIZAN LA NANOCELULOSA OBTENIDA EN CADA TRATAMIENTO. 83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTRUCTURA DE LA PARED CELULAR DE BIOMASA LC. 25
FIGURA 2. ESTRUCTURA DE LA PARED CELULAR VEGETAL. 26
FIGURA 3. ESTRUCTURA DE CELULOSA 27
FIGURA 4. MODELO ESTRUCTURAL DE LA LIGNINA. 30
FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DE NANOCELULOSA. 31
FIGURA 6. CELULOSA NANOFIBRILADA. 32
FIGURA 7. ESQUEMA DE CNC PROCESADA CON ÁCIDO. 33
FIGURA 8. ESQUEMA VISUAL DE PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA. 34
FIGURA 9. HIDRÓLISIS ÁCIDA DE LA NANOCELULOSA. 37
FIGURA 10. APLICACIONES EN LA BIOMEDICINA. 39
FIGURA 11. APLICACIÓN EN MEDICINA Y MATERIALES DE LA NANOCELULOSA, A) MEDICAMENTOS, B) APÓSITOS, C Y D) COMPARACIÓN DE LA REFRACCIÓN DE LUZ A TRAVÉS DE UN VIDRIO Y NANOCELULOSA CORRESPONDIENTEMENTE 40
FIGURA 12. VISTA DE UNA JUGUERÍA EN EL MERCADO MODELO 44
FIGURA 13. BAGAZO DE PIÑA RECOLECTADO DE UNA JUGUERÍA DEL MERCADO MODELO. 45
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DEL BAGAZO DE PIÑA 48
FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA DEL BAGAZO DE PIÑA POR HIDRÓLISIS ÁCIDA 50
FIGURA 16. IMAGEN VISUAL OBTENIDA DEL MICROSCOPIO ÓPTICO DEL BAGAZO DE PIÑA 68
FIGURA 17. IMAGEN OBTENIDA DEL MICROSCOPIO ÓPTICO DE LA CELULOSA EN CADA EXPERIMENTO. 74
FIGURA 18. ESPECTRO FTIR DE LA NANOCELULOSA TRATADA AL 62% Y 70% 76
FIGURA 19. VISUALIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA OBTENIDA POR HIDRÓLISIS ÁCIDA DE CADA TRATAMIENTO A TRAVÉS DE UN MICROSCOPIO ÓPTICO. 78
FIGURA 20. ETAPAS DE LA CELULOSA HASTA LA OBTENCIÓN DE LA NANOCELULOSA 79
FIGURA 21. GRÁFICO DEL RENDIMIENTO CALCULADO DE LA CELULOSA EXTRAÍDA EN CADA TRATAMIENTO 84

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo la obtención de nanocelulosa a partir del bagazo de piña (Ananas comosus) mediante un proceso de hidrólisis ácida. Para ello, se empezó extrayendo la celulosa de la materia prima con la aplicación de 6 tratamientos alcalinos con hidróxido de sodio a distintas concentraciones (5% y 10%) y temperaturas (25 °C, 65 °C y 100 °C), evaluando el rendimiento y contenido de alfa-celulosa. La muestra con mejores resultados (T2), evidenció un contenido de celulosa de 23.913% y de alfa-celulosa de hasta 58.798%, esta se utilizó para la obtención de nanocelulosa mediante hidrólisis con ácido sulfúrico con las concentraciones de 62% y 70% y complementado con tratamiento ultrasónico. Se caracterizaron las muestras mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), análisis de transmitancia UV-visible y observación microscópica. El tratamiento con ácido sulfúrico al 62% presentó mejores características en cuanto a contenido de grupos funcionales de materia celulósica, cristalinidad con una transmitancia de 86.877%, y estructura visual presentando características de estructuras nanofibrilares sin aglomeraciones, mientras que al 70% se observó degradación parcial debido a que altas concentraciones de ácido resultan muy agresivos para la celulosa. Se concluye que el bagazo de piña es una fuente viable para la obtención de nanocelulosa, siendo clave optimizar las condiciones del acondicionamiento y pretratamiento de la materia prima, además de la hidrólisis para preservar la estructura nanocristalina.

Palabras clave: Nanocelulosa, Bagazo de piña, Hidrólisis ácida, Celulosa, Espectroscopía infrarroja, Microscopio óptico, Ultrasonido.

ABSTRACT

This research aimed to obtain nanocellulose from pineapple bagasse (Ananas comosus) through an acid hydrolysis process. The study began with the extraction of cellulose using six alkaline treatments with sodium hydroxide at different concentrations (5% and 10%) and temperatures (25 °C, 65 °C, and 100 °C), evaluating both cellulose yield and alpha-cellulose content. The best-performing treatment (T2) yielded 23.913% cellulose and up to 58.798% alpha-cellulose. This sample was used for nanocellulose production via sulfuric acid hydrolysis at concentrations of 62% and 70%, complemented by ultrasonic treatment. The resulting nanocellulose was characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), UV-visible transmittance analysis, and optical microscopy. The treatment with 62% sulfuric acid showed better characteristics in terms of functional cellulose groups, crystallinity (with a transmittance of 86.877%), and nanofibrillar structure without agglomeration. In contrast, the 70% treatment resulted in partial degradation, as high acid concentrations are highly aggressive to cellulose. It is concluded that pineapple bagasse is a viable raw material for nanocellulose production, highlighting the importance of optimizing pretreatment and hydrolysis conditions to preserve its nanocrystalline structure.

Keywords: Nanocellulose, Pineapple bagasse, Acid hydrolysis, Cellulose, Infrared spectroscopy, Optical microscopy, Ultrasound.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, los mercados de abasto generan diariamente grandes cantidades de residuos orgánicos, especialmente restos de frutas y verduras, que en su mayoría son arrojados a las calles y no reciben un tratamiento adecuado. Esta situación da lugar a focos de contaminación, proliferación de vectores biológicos como moscas, cucarachas y roedores, así como de emisión de gases contaminantes por la descomposición de la materia orgánica, generando además malos olores en las zonas circundantes.

En Chiclayo, esta problemática es especialmente notoria en zonas comerciales o mercados como el Mercado Modelo, donde a diario se desechan grandes cantidades de bagazo de piña tras el procesamiento y venta de jugos. Frente a esto, resulta necesario promover alternativas sostenibles que permitan revalorizar estos residuos orgánicos, transformándolos a través de procesos limpios y de bajo impacto ambiental.

Una de las opciones más prometedoras es la extracción de celulosa y su posterior transformación en nanocelulosa, un nanomaterial de origen renovable, biodegradable y con propiedades mecánicas y fisicoquímicas excepcionales. Este material ha cobrado gran interés por su versatilidad, ya que se encuentra en la temática de empaques biodegradables, biomedicina, recubrimientos, entre otros campos.

La producción de nanocelulosa requiere de procesos químicos como la hidrólisis alcalina, seguida de una hidrólisis ácida controlada con ácido sulfúrico, que permite reducir las fibras celulósicas a dimensiones nanométricas. Sin embargo, factores como la

concentración del reactivo y la temperatura influyen significativamente en la calidad final del producto, pudiendo incluso inducir su degradación si no se controlan adecuadamente.

Pese a los avances tecnológicos en este campo, la mayoría de investigaciones se han enfocado en materias primas convencionales como la madera o el algodón, siendo escasos los estudios que valoran residuos agroindustriales no madereros como el bagazo de piña, lo que subraya la necesidad de explorar su potencial. Además, el aprovechamiento del bagazo de piña contribuiría a reducir los niveles de contaminación, fomentar la responsabilidad ambiental en las personas y abrir líneas de investigación en el uso de materias primas no madereras.

En ese marco, esta investigación tiene como finalidad evaluar la viabilidad del bagazo de piña, residuo ampliamente generado en la ciudad de Chiclayo, una ciudad de un clima cálido ubicada al norte del Perú, como fuente alternativa para la producción de nanocelulosa, utilizando metodologías accesibles. Esta propuesta se justifica tanto por su relevancia ambiental y social, como por su aportación al conocimiento científico.

II. DISEÑO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Lozada Parra, A.D. (2020) estableció como objetivo principal, obtener nanocelulosa de la cáscara de café mediante el uso de tratamientos de lixiviación y ácidos básicos. El diseño fue experimental y las variables del proceso fueron el tiempo de tratamiento ácido y la relación ácido/celulosa. Se utilizó un diseño factorial 4x3 para estudiar estas variables, lo que resultó en las condiciones ideales con un tiempo de 45 minutos y una relación ácido/celulosa de 10 mL/g.

Sanaguano Peralta, S.E. (2021). El objetivo principal, presente en su investigación fue obtener nanocelulosa con hojas de mazorca de maíz, el cual consistía usar tratamiento alcalino y blanqueo, en donde se trabajó con 2 variables: concentración de hidróxido de sodio y temperatura de extracción, en donde se realizó la caracterización morfológica y química, obteniendo resultados con un rendimiento del 38.94% y un contenido de alfa celulosa de 91.51%., posterior a esto obtuvo la nanocelulosa mediante 2 métodos: hidrólisis ácida y ácido sulfúrico al 60 y 65 %, el cual tuvo mejor resultado el método de ácido sulfúrico ya que presentaba un valor de 90.779 % de rendimiento.

Ramírez Hernández, Z. (2020) realizó un estudio para obtener nanocelulosa a partir de los desechos de la industria citrícola en Álamo Temapache, Veracruz. Utilizando métodos como hidrólisis ácida y alcalina, blanqueamiento con hipoclorito de sodio y sonicación como método mecánico. El resultado fue celulosa en polvo fina, seca y blanca con un rendimiento del 14.16%.

Presenda, A., Bolio, G., Azamar, V., Ramírez, J., Sarracino, O., Hernández, M., De La Cruz, P. (2020). En su investigación se extrajo celulosa de los desechos de piña mediante la

utilización de pre-hidrólisis ácida al 0,5 % y ácido sulfúrico. También emplearon el método de pulpeo de Sosa con antraquinona y blanqueo libre de cloro elemental, lo que resultó en un rendimiento de celulosa del 93 %.

Herrera Terán, M.E (2018) cuyo objetivo principal fue aislar las pulpas de abacá, con la finalidad de obtener nanocristales de celulosa, utilizando el método de hidrólisis ácida. El mejor resultado que pudo obtener utilizando un diseño experimental fue que las condiciones más favorables estuvieron a 45 minutos y 10 Ml/g, lo que produjo nanocristales de celulosa tipo IB con un espesor de 4.69 nm y una longitud de 300,90 nm con un rendimiento de 7.94 % y una cristalinidad de 82.26%.

Decheco Egúsquiza, A.C (2018) experimentó el impacto de la aplicación de la enzima celulosa fúngica en las cáscaras de piña tipo Golden para producir jarabe glucosado. El resultado fue una concentración de celulosa del 1.5 % (p/v) durante un tiempo de hidrólisis de treinta horas, así como un valor promedio de azúcar reductora del 14.5% y dextrosa del 31.3%.

Arango Pérez, S.E (2022) evaluó la obtención y caracterización de nanocelulosa fibrilar a partir de la madera de bolaina blanca en donde se evalúa a diferentes alturas del eje longitudinal. El rendimiento de la nanocelulosa fibrilar mediante tipo apical, media y basal fue de 32,1 %; 33,6 % y 31 %. En todo lo que es su diámetro en el mismo régimen fue de 84nm,75nm, 69nm respectivamente lo cual no fue el resultado esperado. Por otro lado, los valores que oscilan entre 200 nm y 300nm, mostraron el rendimiento de la nanocelulosa en 76 %, 93% y 96% con respecto a lo apical, media y basal.

García, D., Zegarra, R. (2020). En su tesis aisló la nanocelulosa de la corteza de sandía con la finalidad de obtener las imágenes morfológicas, mediante el método de microscopía

electrónica de barrido. Después de realizar un tratamiento alcalino con KOH y luego usar el proceso de hidrólisis ácida, los autores encontraron un rendimiento de nanocelulosa de 64.96% a 60% de H2SO4 y una hidrólisis de 30 minutos. Además, se encontró que la morfología de las nanocelulosas era más evidente a 200 µm que a 100 µm.

Quispe, J., Velásquez, P. (2022). La finalidad de su estudio es obtener celulosa con residuos de tallos de quinua, utilizando un digestor para el proceso de extracción en donde se efecto tratamiento medio alcalino 15% (p/v) de hidróxido de sodio y licor blanco, y se obtuvo como resultado 48.1 % de celulosa.

Ortega Cahui, M.B (2019). La finalidad de su tesis fue obtener bioplástico mediante la paja y residuos de granos de arroz, el tratamiento que utilizo fue hidrólisis básica utilizando hidróxido de Sodio al 10 % con un blanqueamiento de pulpa con hipoclorito de sodio al 1%. Por otro lado, el rendimiento de celulosa y almidón que se obtuvo fue de 42 .06 % y 47.44 %.

III. BASES TEÓRICAS

La piña:

La piña (Ananus Comosus), es originaria de América del Sur, perteneciente a la familia Bromeliaceae, la cual está compuesta por más de 3408 especies y 58 géneros (Pérez et al., 2020). Debido a su capacidad para adaptarse a diversos tipos de hábitats y altitudes, se puede encontrar en una amplia gama de ubicaciones, que van desde 4500 m s. n. m. (Rodríguez et al., 2020).

Asimismo, el consumo de esta fruta tropical aporta una serie de vitaminas y minerales como es la vitamina C, hierro, magnesio, potasio, además de ser una buena fuente de hidratación y contar con un bajo nivel calórico, haciendo de este un alimento importante en la dieta diaria (Gavin, 2022).

A nivel mundial, Asía – Pacífico fue el que generó en el año 2021 una mayor producción de piña, con un total de 13 millones de toneladas el cual representa el 41 % de la mayor producción en el mundo, por otro lado, América obtuvo el segundo lugar debido a que exporto 10.2 millones de toneladas y en última estancia África produjo un total de 5.2 millones de toneladas. Además, en el mundo, la piña se encuentra en expansión con un flujo de crecimiento de 27 millones de dólares en 2023 y se proyecta para el 2028 a 36 millones de dólares. No obstante, la producción de piña mayormente es limitada, encontrándose principalmente en regiones tropicales, las variedades como cayena lisa se cultivan en Sudáfrica, México, cuba, Taiwán, Puerto Rico, Australia, Filipinas, Hawái (Agraria, 2023).

La piña en el Perú

Durante el primer periodo de 3 meses en 2023, Perú exportó 575 toneladas de piña, adquiriendo un ingreso económico de 1.95 millones de dólares, estoy hizo que se registrara un aumento del 58 % en volumen y un 29 % en el valor de este fruto.

Estados unidos fue el país que más importo la piña del Perú. El país importo 560 toneladas por un valor 1.95 millones de dólares. Por otro lado, Chile fue el segundo país que exporto piña a Estados unidos obteniendo así 24 mil dólares por 10 toneladas (Agraria, 2023).

En el primer trimestre del 2024, el alcance de la piña logró aumentar de 10 países a un total de 14, teniendo como la más adquirida a la piña en conserva con un porcentaje del 61.5% en exportaciones a nivel mundial con un total de 582 toneladas por un ingreso económico de 1.8 millones de dólares. En segundo lugar, la piña deshidratada con un 29.4% de exportaciones resultó con 837 mil dólares y el tercer lugar el puré con una representación de exportación del 4.4%.

La empresa Gandules INC. S.A.C., fue la principal empresa exportadora con mayor producción, en volumen y valor, debido a que proceso 336 toneladas de piñas valorizadas en 1.2 millones de dólares, liderando con un 41.1% de envíos. (Agraria, 2024).

Características de la piña

La piña contiene una enzima llamada bromelina, se encuentra en el tallo y en el fruto, esta, ayuda al proceso de digestión y fragmenta proteínas con la finalidad de convertirlas en aminoácidos. (Guía de alimentos, s.f.).

Composición de la piña

El agua es el principal componente de la piña, que representa el 86 % de su peso. Los carbohidratos son el principal nutriente de la piña, que representa alrededor del 13 % de su peso. También se puede saber que la piña tiene un alto contenido en vitamina C, así como de

fibra dietética. Así mismo, esta fruta contiene minerales, ricos en potasio, magnesio, hierro y calcio. Por otro lado, presenta niveles bajos de sodio y grasas (Ortega et al., 2021).

Composición fitoquímica de la piña.

Tabla 1.

Compuestos bioactivos de la piña.

Fuente	Pulpa	Jugo	Cáscara
Total, de vitamina (mg/100 gr)	47.8		-
Fenoles totales (mg/100 gr)	77.5	358	-
Carotenoides (µg/100 de β caroteno)	42.8	-	-
Fibra dietética %	2.8	-	70.6
Fenólicos ligados a la fibra dietética (mg/100 gr)	-	-	2270

Nota: Extraído de Ortega et al., (2021)

Bagazo de piña

El bagazo de piña o también conocido como mosto, es el residuo que genera la piña una vez que es colada, para hacer un derivado. En lo que va del año del 2023, se han exportado más de 511 toneladas de piñas, esto genera un 15 % de residuos en cáscara y bagazo de piña. (AgroOrgánico, 2020). El aprovechamiento de dichos residuos se utiliza para la elaboración de empaques biodegradables con la finalidad de proteger el medio ambiente.

Por otro lado, esto disminuye la deforestación y tala de árboles en la amazonia peruana, en el 2022 se registró 5806 hectáreas de bosques deforestados y talados. (Vera, E. 2023)

Obtención de nanocelulosa a partir de biomasa lignocelulósica

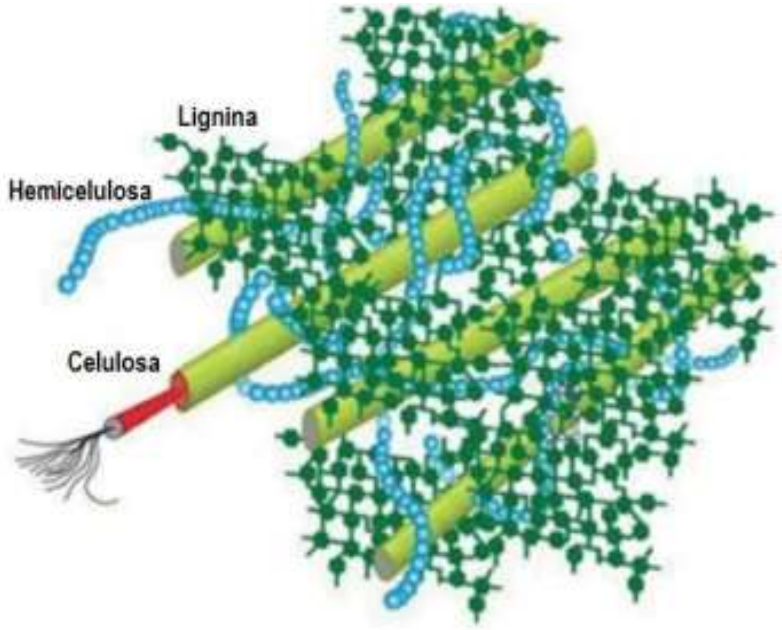
En la actualidad se ha vuelto muy atractivo el estudio de la obtención de nanocelulosa, en la cual la materia prima es la biomasa lignocelulósica, debido a que sus destacadas características y propiedades, lo que deja una puerta abierta a futuras aplicaciones. Se lleva a cabo dos etapas: la primera etapa es un pretratamiento para la eliminación de componentes no celulósicos (hemicelulosa, lignina, etc.), luego la nanocelulosa es extraída de las fibras de la celulosa, por aplicación de varios procesos de extracción. (Phanthong et al. 2018)

Biomasa lignocelulósica

El material lignocelulósico está compuesto principalmente por los siguientes polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, con una pequeña cantidad de sólidos extractivos y cenizas (ver figura 1).

Figura 1.

Estructura de la pared celular de biomasa LC.

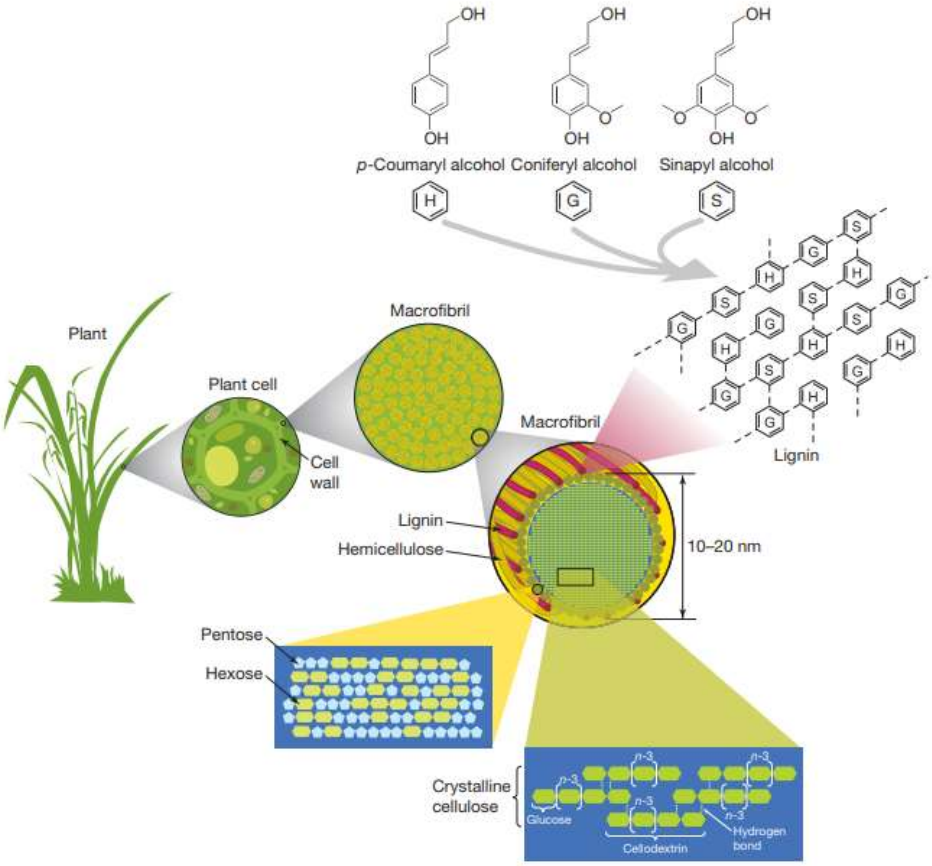


Nota. Extraído de Wang et al., (2017)

Existen diversas formas de clasificar la biomasa LC, de la cual la más conocida industrialmente es la maderera, pero actualmente también se encuentra en potencia, la biomasa no maderera que abarca incluso los residuos agrícolas (bagazo de caña, fibra de algodón, gramíneas, etc.) (Afanasjeva et al., 2017).

Figura 2.

Estructura de la pared celular vegetal.



Nota. Recopilado de Rubín, (2008).

Celulosa

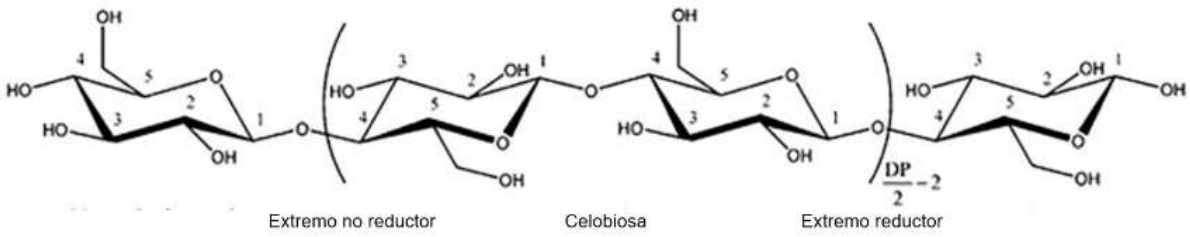
En el mundo, la celulosa es conocido como el biopolímero natural más abundante, con la capacidad de un buen rendimiento a nivel industrial por lo cual su producción al año llega a

más de 1.5 billones de toneladas, entre sus características destacan ser un recurso renovable, sus grandes propiedades mecánicas y su reactividad (Zambrano et al., 2021).

Asimismo, independiente de la fuente (madera, algodón, cáscaras de cereales, bagazo, otros residuos), posee una cadena lineal que está conformado por unidades de D-anhidroglucopiranosa relacionadas por enlaces β-1,4-glicosídicos. Los puentes de hidrogeno que forman las moléculas de celulosa tienden a ser intermoleculares e intramoleculares, ocasionando que al primer estimulo, estos biopolímeros, se alineen para formar microfibrillas, fibrillas y paredes celulares de fibra sucesivamente (Labrador y Osto, 2021). Adicional a lo anterior, la presencia de tres grupos OH en cada una de las unidades estructurales le permite reaccionar bien sea como un alcohol, un éster o un éter. Esto ha permitido ampliar la gama tanto de modificaciones químicas posibles como de derivados; y que hayan sido empleados tanto por la industria farmacéutica como por la de alimentos o la textil. Años recientes, polímeros derivados de la celulosa han adquirido un renovado interés debido a su potencial biodegradación. (Gañan et al., 2017).

Figura 3.

Estructura de celulosa.



Nota. Recopilado de Alfaro et al., (2024)

Obtención de la celulosa

Existen dos métodos importantes para la obtención de celulosa, usados con frecuencia a escala industrial, se ha ido presentando ciertas modificaciones según el uso que se presente.

Método químico. Este método tiene propuesto disolver la lignina, por lo cual la madera se hierve químicamente a alta temperatura y presión utilizando una solución alcalina, liberando así las fibras. Dependiendo de los aditivos químicos que se utilizan durante el proceso, se obtendrán diferentes tipos de papel, por ejemplo, los aditivos más usados industrialmente son Kraft y al sulfito, siendo la primera más referida y aclamada en el mundo. Dado que el rendimiento global del material de partida es parcialmente bajo, sólo queda del 40 al 55% en el producto final, el resto se pierde en la solución alcalina. Pero este tipo de celulosa tienen la cualidad de ser muy estables y resistentes porque las fibras se mantienen perennes, además de la facilidad de blanqueamiento y con el tiempo sería menor la probabilidad de perder sus cualidades. (Velasco et al., 2020).

Método mecánico. Durante el proceso mecánico, la madera se muele y se tritura bajo las condiciones de subidas temperaturas y presiones. A continuación, la pasta se clasifica, lava y finalmente blanqueada. La pulpa mecánica tiene un alto rendimiento de utilización, generalmente del 85 al 95%, pero existen imprevistos y dificultados en el proceso, como la posibilidad de oxidación de la lignina restante en el producto, provocando un color amarillento como el de periódicos viejos (Velasco et al., 2020).

Hemicelulosa

Se resalta de la hemicelulosa que es el componente más complejo en la estructura de la pared celular. Asimismo, son un grupo de heteropolisacáridos que están constituidas por cadenas complejas ramificadas y cortas de azúcares: Destacando, pentosas (D-xilosa y L-arabinosa), hexosas (D-manosa, D-galactosa y D-glucosa), además de ácidos urónicos y desoxihexosas (Javier, 2021). Estas cadenas están unidas por enlaces β (1;4) y α (1;3), y por la presencia de carbohidratos útiles en su estructura, puede usarse en diversos experimentos e

investigaciones para la producción de biocombustibles, azúcares fermentables y reaprovechables, entre otros (Rosas, 2023).

Debido a que la hemicelulosa presenta con la lignina, enlaces covalentes y con la celulosa, enlaces puente de hidrogeno, además de diferentes sustituyentes relacionados al esqueleto carbonatado, está se definiría como amorfa. La función principal de la hemicelulosa va dirigido a la pared celular vegetal, y se trata de ser un refuerzo a esta misma, además de tener funciones de almacenamiento en semillas y ser fuentes de señalización molecular. Este heteropolisacárido está dividido en 4 grupos de polisacáridos: xilanos, mananos, xiloglucanos y glucanos con enlaces mixto. Asimismo, el principal componente de la hemicelulosa vendría siendo, el xilano, el cual confiere fuerza a la pared secundaria. Según las características de la hemicelulosa se determinaría su gran rendimiento para la producción de etanol y la industria del papel (Javier, 2021).

Lignina

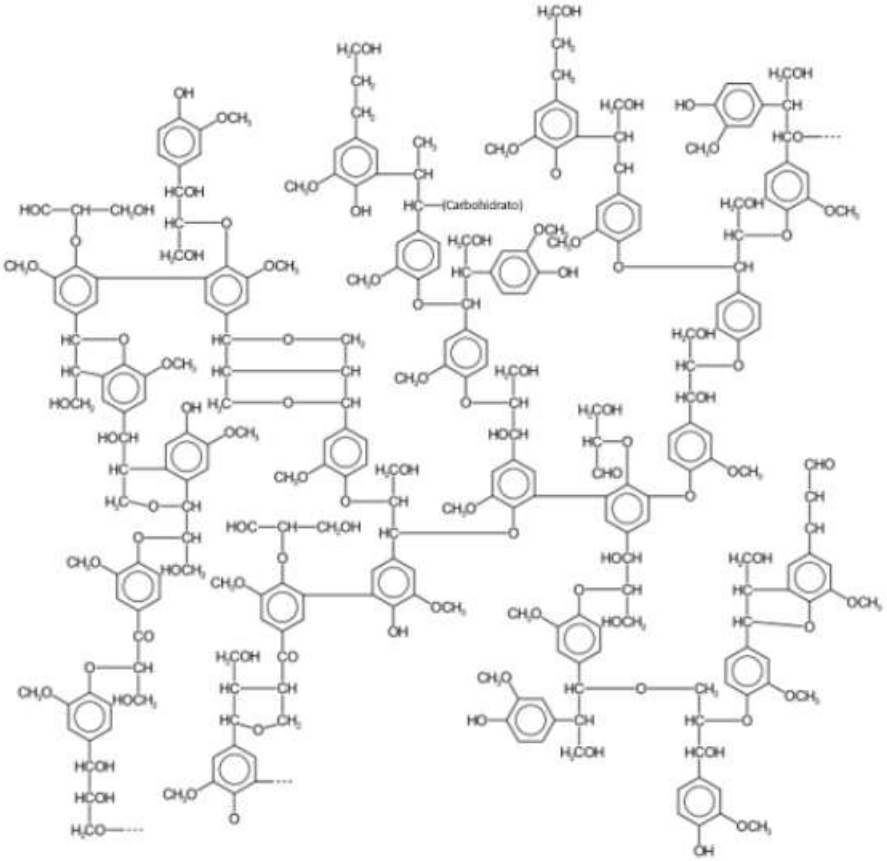
La lignina está presente en las plantas con un porcentaje significante del 15 al 40 % en la pared celular, siendo también el biopolímero aromático más abundante. Además del tercer polímero orgánico más abundante, tras la quitina y celulosa, con una producción de 600 millones Tn anual (Espinoza, 2019).

Esta se caracteriza por brindar resistencia, impermeabilidad y presión hídrica a las plantas y soporte estructural a células especializadas en almacenamiento y sostén. Estructuralmente, es un heteropolímero amorfo, insoluble en agua, formada por uniones de diferentes monómeros y enlaces, debido a la presencia de diversas enzimas durante la biosíntesis y polimerización que ocurre en la pared celular (Maceda et al., 2021).

Asimismo, por sus características presentes, esta cuenta con una diversidad de ventajas en el ámbito económico e industrial. Con un origen renovable debido a su origen en la biomasa, representaría del 0,25 al 0,33% del carbono orgánico en el planeta tierra lo que le permite una alta posibilidad de desempeño en la industria de la biorrefinería para lograr sostenibilidad económica (Gutiérrez et al., 2020).

Figura 4.

Modelo estructural de la lignina.



Nota. Extraído de Rosas, (2023)

Nanocelulosa

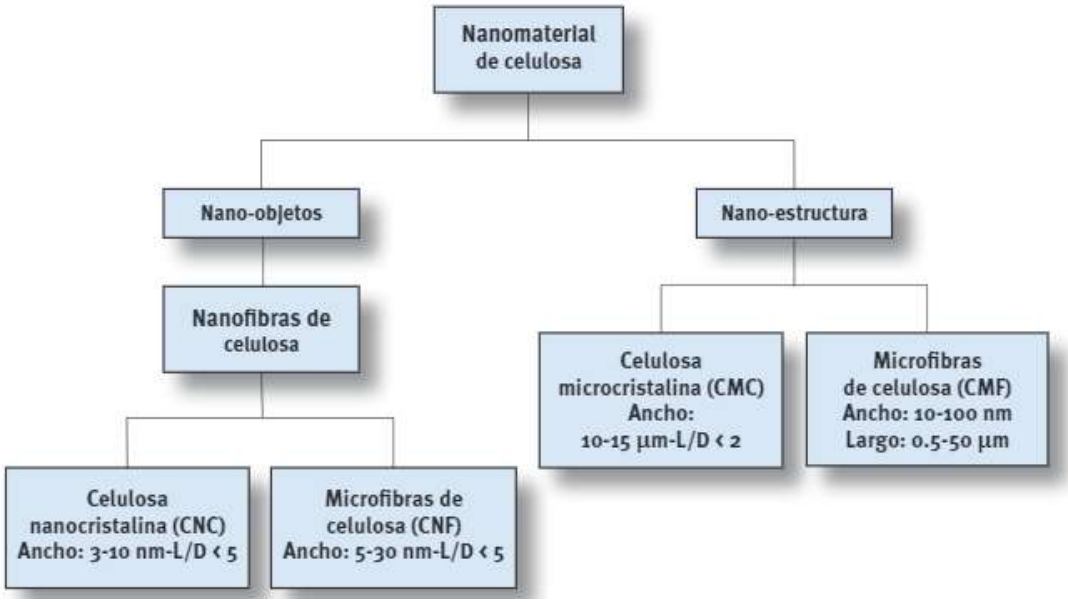
Nanocelulosa es el cristal o fibra de celulosa, pudiendo tomar forma de nanocristales o nanofibras con la visualización de la dimensión del nanómetro (Muñoz, 2018). Siendo un

bionanomaterial de peso ligero, que se puede extraer de la pared celular vegetal, asimismo, con relación a su tamaño nanométrico (menos de 100 nm de diámetro), le proporciona ciertas propiedades que generan atención, como su gran resistencia, alta superficie y rigidez impecable de hasta 220 GPa de módulo estático. Además, estructuralmente puede modificar su superficie accesiblemente por la presencia de una elevada cantidad de grupos hidroxilos. (Phanthong et al., 2018)

Muñoz (2018), señala que existen tipos de nanocelulosa clasificados en diversas subcategorías ya sea tomando en cuenta la forma, función, dimensión, entre otros. Además, en año 2011, la Asociación Técnica de la Pulpa y de la Industria del Papel conocida por sus siglas en inglés como "TAPPI", propuso términos estándar y las definiciones correspondientes para la nanocelulosa. Puede observarse la clasificación definida por la TAPPI en la (figura 5).

Figura 5.

Clasificación de nanocelulosa.



Nota. Recopilado de Muñoz, (2018).

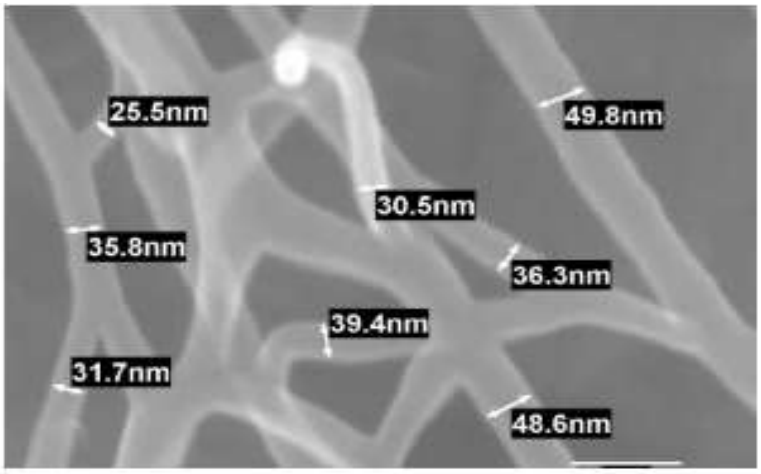
Tipos de nanocelulosa

Nanofibras de celulosa (CNF). Con un diámetro de 10 a 40 nanómetros y longitudes que varían entre los 500 y por sobre los 1000 nanómetros, la celulosa nanofibrilar posee partes con aspecto cristalino y amorfo alternadamente, asemejándolo morfológicamente con un fideo. Existen diversos métodos para extraer las nanofibras de celulosa, entre las cuales las más aplicadas son: Métodos mecánicos como la homogenización a altas presiones y criomolienda, además existen otros métodos como el enzimático o químicos (Vidales, 2019).

Phanthong, Reubroycharoen, Hao, Xu, Abudula y Guana., (2018) señalan que "en comparación con la celulosa nanocristalina, la celulosa nanofribilada tiene una longitud más larga con una relación de aspecto alta (longitud a diámetro)". (p. 3).

Figura 6.

Celulosa nanofibrilada.



Nota. Recopilado de la web de Universidad Complutense Madrid

Nanocristales de celulosa (CNC). La celulosa cristalina, conocida también como nanocristales de celulosa, nanowhiskers de celulosa o CNC puede variar en dimensión y

cristalinidad de acuerdo con la materia de uso y el proceso a realizarse. Su forma asemejada a un grano de arroz consta de un diámetro comprendido entre los 2 y 50 nanómetros y la longitud tiene un rango de 100 a 600 nanómetros, asimismo casos un poco superiores a los 1000 nm. (Phanthong et al., 2018) (Muñoz, 2018).

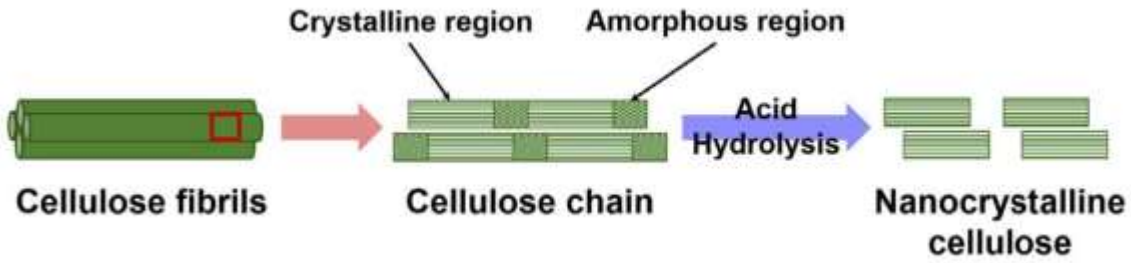
Según Vidales (2019), señala que "el tamaño depende del origen de la celulosa, así como de la temperatura, tiempo, concentración y naturaleza del ácido empleado área la hidrólisis" (p. 21).

Además, destacando la alta cristalinidad de la CNC, rondando al 90%, suele tener un comportamiento rígido con un rango de valores de módulo de Young (E) entre 100-200 MPa y como está cubierta por grupos semiéster negativos ($-OSO_3^-$), los nanocristales debido a que presentan fuerzas electrostáticas repulsivas, generan una mejora de estabilidad en su dispersión en agua (Lizundia et al., 2020).

Según Muñoz (2018), los nanocristales de celulosa pasan por un proceso de hidrólisis ácida para su formación, en la cual se genera la ruptura de moléculas interfibrilares que permiten la unión de las microfibrillas, procediendo a separar lo no-cristalino.

Figura 7.

Esquema de CNC procesada con ácido.

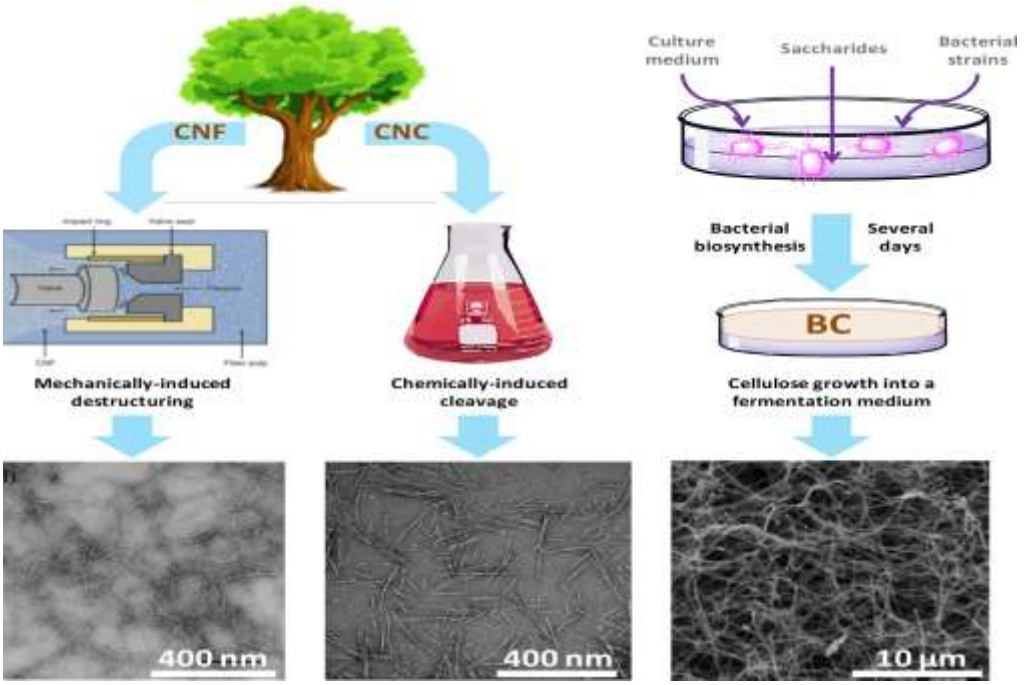


Nota. Extraído de Phanthong et al., (2018).

Nanocelulosa bacteriana (BNC). Por su mismo nombre, es producida por bacterias que hacen efecto por la acumulación de los azúcares con característica de peso molecular bajo. Entre las bacterias más usadas en este proceso, se encuentra del grupo Acetobacter y gluconobcater, como la Gluconacetobacter xylinus, con una duración estimada de días hasta dos semanas. La BCN se caracteriza por encontrarse pura, excluyendo otros componentes de la biomasa lignocelulósica como es la lignina, hemicelulosa, etc., además de tener una forma de cinta retorcida y un diámetro entre 20-100 nm (Phanthong et al., 2018). Este tipo de nanocelulosa, es una materia prima potencial en el ámbito de medicina, debido a tiene resistencia mecánica, es altamente pura, biodegradable y propiedades no toxicas, lo que lo vuelve ideal en producción de apósitos y piel artificial (Espinosa, 2019).

Figura 8.

Esquema visual de procesos para la obtención de nanocelulosa.



Nota. Recopilado de Lizundia et al., (2020).

Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica

Existen diversos pretratamientos para la biomasa LC, las cuales se clasifican en físicos, químicos mecánicos y biológicos. A continuación, se mencionan los más conocidos:

Físico

Térmico. Este pretratamiento se caracteriza por aumentar la solubilización, ya que, a elevadas temperaturas, la viscosidad disminuirá. Asimismo, es importante mantener la temperatura entre 50-160° C y mantener un rango de pH entre 4-7, para así evitar la creación de inhibidores. (Banu et al., 2021)

Químico

Ácido. Para el proceso se puede usar acido diluido como acido concentrado, en lo cual el ácido más utilizado es el ácido sulfúrico, pero también se reporta el uso de otros ácidos como el nítrico, acético y clorhídrico. Este pretratamiento ácido ocasiona que se interrumpa las fuerzas de Van der Waals, enlaces covalentes y enlaces de hidrógeno que unifican la biomasa, dando como resultado la liberación de compuestos intracelulares y la lisis celular (Espinosa et al, 2022) (Banu et al., 2021).

En el proceso usando clorito-ácido, es conocido como deslignificación o de blanqueo, eliminando en gran cantidad la lignina y otros componentes, mezclando agua destilada, ácido acético y clorito de sodio a la biomasa LC, la temperatura debe variar entre 70-80 °C en un tiempo de 4-12 h (Phanthong et al., 2018).

Alcalino. Es el pretratamiento de apoyo a la digestión anaeróbica, siendo el proceso químico de preferencia para la biomasa lignocelulósica, por desintegrar la lignina y componentes fenólicos. El álcali generalmente usado es el hidróxido de sodio con un

porcentaje en peso del 4-20%, y que requiere de una agitación continua durante 1-5h. Posteriormente el producto solido se lavaría con agua destilada hasta la neutralidad de su pH, terminando con su secado en estufa a 50 °C (Phanthong et al., 2018) (Banu et al., 2021).

Procesos de extracción de nanocelulosa

Existen diversas técnicas de extracción de nanocelulosa, a continuación, se explicarán dos de las técnicas más utilizadas:

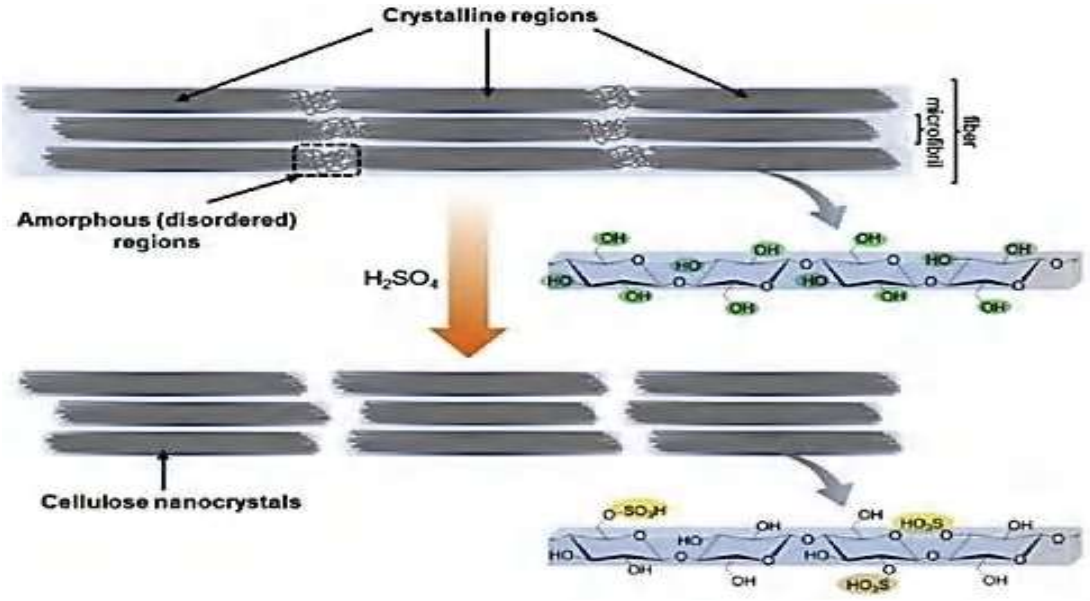
Hidrólisis Ácida

Es el proceso preferente en la extracción de nanocelulosa, debido a la estructura de las cadenas de celulosa, lo que las hacen más hidrolizables con ácido. El ácido con mayor rendimiento en el proceso es el sulfúrico, porque aísla altamente la celulosa nanocristalina y hace que se expanda como un sistema de coloides estables. Como factores importantes en la obtención, se debe tener en cuenta el tiempo de reacción, concentración de ácido y temperatura. (Phanthong et al., 2018)

También se han reportado otros ácidos como variante del sulfúrico, que son el clorhídrico, maleico, etc. Continuando con el proceso de hidrólisis, después del ácido, se termina la reacción vertiendo agua desionizada y una próxima centrifugación o filtración, por último, un enjuague y diálisis para la eliminación de sal neutralizada o restantes existentes de ácido. Se recomienda una filtración por centrifuga para separar partículas más grandes que queden suspendidas en el producto final además de tratamientos ultrasónicos para dispersar la nanocelulosa en la suspensión (Sanaguano, 2021).

Figura 9.

Hidrólisis ácida de la nanocelulosa.



Nota. Extraído de Du et al., (2019).

Mecánico

Los procesos mecánicos como homogeneizadores de alta presión, trituradores, molienda por bolas, criotrituración, tratamientos ultrasónicos de alta intensidad, entre otros, son algunos de los más usados para extraer fibrillas de celulosa. En este proceso se usa una elevada fuerza de corte para separar longitudinalmente las fibras, obteniendo celulosa microfibrilada, el tratamiento se realiza varias veces, pero esto causa una disminución de la cristalinidad de la nanocelulosa. Pero este proceso también puede ir acompañado de tratamientos químicos para deshacerse del material amorfo (Sanaguano,2021).

Para la obtención de tamaños nanométricos de diámetro de las microfibras de celulosa en el proceso mecánico de homogeneización a alta presión, esta debe realizarse pasando la celulosa obtenida a un recipiente con alta agitación y presión.

En el tratamiento con el molino de bolas, se desfibrila la celulosa por la fuerza centrífuga ocasionada de la fuerza de corte que realiza el impacto entre bolas y la superficie del molino, este proceso obtiene un diámetro nanométrico de las fibras, pero el alto consumo de energía es un obstáculo para su uso (Phanthong et al., 2018).

Aplicaciones de la nanocelulosa

Los nanomateriales están revolucionando las diferentes industrias en el mundo, se reportan distintos avances de gran interés en las diversas áreas mencionadas a continuación:

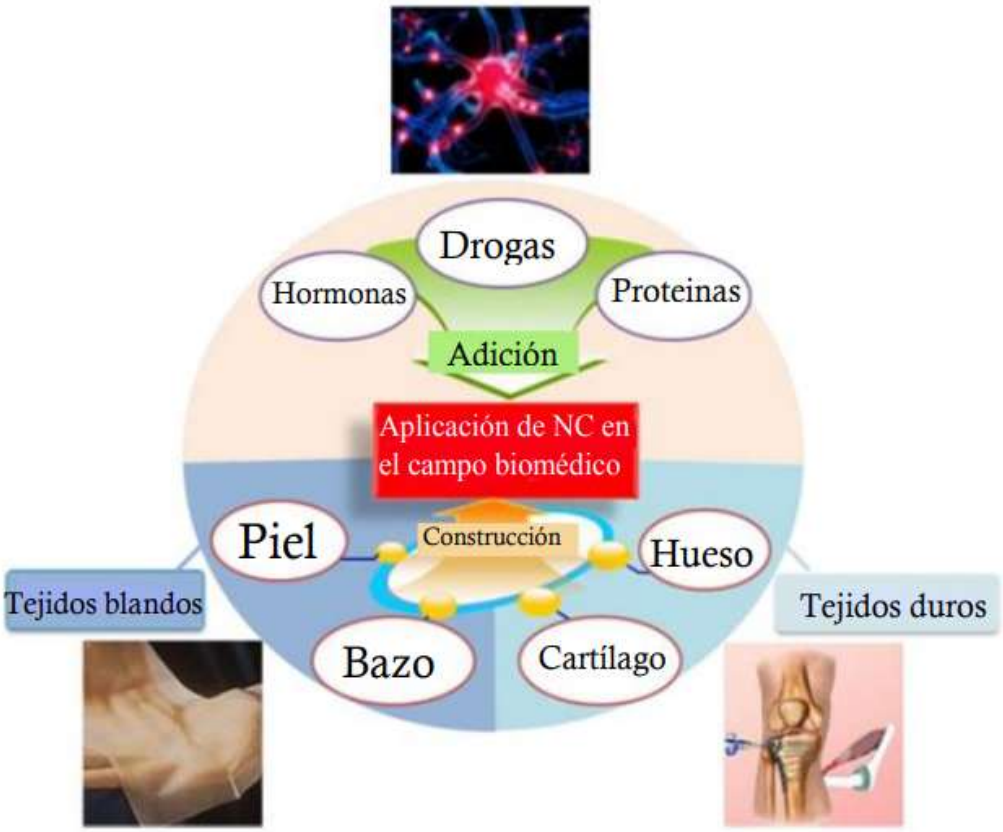
Biomédicas

Las aplicaciones de la nanocelulosa comenzaron con su hallazgo de ser un hidrogel con alto nivel de biocompatibilidad, ese fue el impulso para que diferentes científicos consideren que es una buena alternativa al ya conocido "polímero sintético". (Muñoz, 2018).

Es un potencial nanomaterial para la fabricación de reemplazos de tejidos, además los nanocristales de celulosa muestran ser de gran interés por ser biocompatibles, biodegradables, de baja o nula toxicidad, cristalinos, entre otras características. Lo que le permite contribuir en la proliferación celular, curación o cicatrización de heridas, ser un excipiente y portador farmacéutico. Si nos enfocamos en la ingeniería de tejidos (TE), la nanocelulosa es un componente prometedor en la reparación de tejido oftálmico, muscular, cutáneo, problemas del tejido en el hígado, corazón, cerebro, etc. (Trache et al, 2020).

Figura 10.

Aplicaciones en la biomedicina.



Nota. Recopilado por los autores.

Ingeniería y construcción

Algunas de sus aplicaciones en esta área son de películas de barrera, material de refuerzo (refuerzos mecánicos y térmicos de matriz polimérica) además de la fabricación de papel. Otro de sus aplicaciones es de refuerzo de compuestos de cementos, ya que se observó que la Nanocelulosa bacteriana provoca un mejor rendimiento en los morteros de cemento.

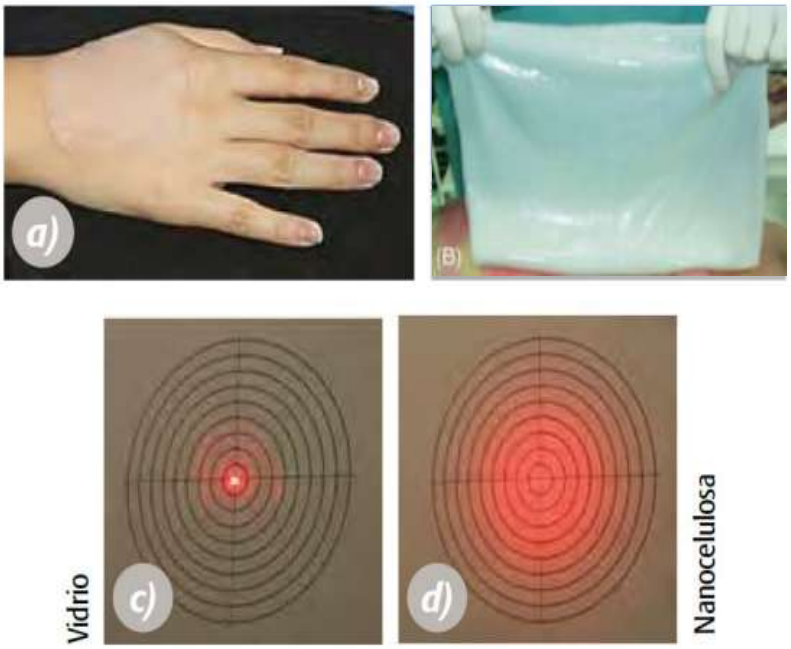
Se refuerzan los polímeros termoestables y termoplásticos con nanocristales de celulosa para aumentar la calidad y durabilidad de estos materiales, ya que los CNC

proporcionar una mayor rigidez y resistencia tanto como a la corrosión y en general. (Trache et al., 2020)

Dado a lo resaltado anteriormente, la nanofibras de celulosa o nanocelulosa bacteriana serían un excelente refuerzo para algunos polímeros con gran fragilidad, como es el caso del ácido poliláctico (PLA) y el polihidroxibutirato (PHB), porque presentan una baja temperatura de distorsión y un porcentaje entre 1-2% de elongación (Muñoz, 2018).

Figura 11.

Aplicación en medicina y materiales de la nanocelulosa, a) medicamentos, b) apósitos, c y d) Comparación de la refracción de luz a través de un vidrio y nanocelulosa correspondientemente.



Nota. Recolectado de Vidales, (2019) y Muñoz, (2018).

Industria alimenticia

Elaboración de nata de coco, producción de bioetanol y vino, sustituto de saborizantes por sus características finales (bajo en calorías), además de encontrar en la elaboración de aditivos alimenticios, emulsificantes y fibra dietética. (Vidales, 2019).

Además, se reportan usos de la nanocelulosa como potencial nanomaterial para el tratamiento de aguas residuales (creación de membranas adecuadas), eliminación de tintes, combatir la contaminación del aire (purificación), por último, una alternativa de bajo costo para técnicas de filtración (ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa). (Trache et al., 2020).

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Diseño de procedimiento a seguir

La presente investigación se basa en un diseño experimental, en la cual se aplicará para la obtención de la celulosa del bagazo de piña y a partir de esto, la final obtención de nanocelulosa. Comenzando con el acondicionamiento de la materia prima, ya señalado como el bagazo de piña, el cual será recolectado de las diversas juguerías de Chiclayo, específicamente del mercado Modelo.

Posteriormente, debido a que no se encontró información sobre las condiciones para la obtención de celulosa a partir del bagazo de piña, se definió una serie de parámetros de acuerdo con las investigaciones encontradas en base a otro tipo de materia prima. Tomando en cuenta para nuestro diseño, la variación de 2 factores, las cuales serán:

- Concentración de hidróxido de sodio (5 y 10 %)
- Temperatura de cocción (T° ambiente, 65 y 100 °C)

Se obtendrán 6 tratamientos, y la proporción fibra/licor (1:15) y tiempo (1h y 30 min) permanecerán constantes, obteniendo para cada experimento una variabilidad con respecto al rendimiento de celulosa y la alfa-celulosa necesaria para el resultado final. Se detalla el diseño experimental a continuación:

Tabla 2.

Diseño Experimental para aplicación

Tratamientos	Parámetros		Respuesta
	Hidróxido de sodio (%)	**Temperatura de cocción (°C)**	
T1	5	Ambiente	% de rendimiento de celulosa
T2	5	65	
T3	5	100	
T4	10	Ambiente	
T5	10	65	Cantidad de alfa-celulosa
T6	10	100	

Con la obtención de cada tratamiento de celulosa, se elegirá el de mayor rendimiento, para así continuar con la obtención de nanocelulosa, utilizando como base previos tratamientos recopilados de investigaciones con resultados favorables. Se aplicará finalmente como proceso para la nanocelulosa, una hidrólisis ácida en la cual usaremos como reactivo ácido sulfúrico a concentraciones de 62% y 70%, a lo cual se combinará adicionalmente con tratamientos de ultrasonidos. Se detalla el diseño experimental a continuación:

Tabla 3.

Diseño experimental para aplicación.

Tratamiento	Parámetro		Respuesta
	Ácido sulfúrico (%)	**Ultrasonido (t)**	
T1	62	70 min	Eficiencia de la nanocelulosa
T2	70		

4.2 Población y muestra

4.2.1. Población

La población corresponde al bagazo de la piña, que es desechada por los diversos establecimientos de juguerías o puestos ambulantes de jugo, que pertenecen al mercado Modelo en la ciudad de Chiclayo.

Figura 12.

Vista de una juguería en el mercado Modelo.

4.2.2. Muestra

La muestra está proporcionada de 2kg de bagazo de piña desechadas de las juguerías del mercado Modelo.

Para la extracción de la celulosa se usaron muestras de 7 gramos de bagazo de piña pretratadas (secas y molidas) para cada uno de los 6 experimentos. Una vez determinado el mejor tratamiento para extracción de celulosa, se trabajó con 65 gramos de bagazo de piña pretratadas.

En la preparación de la nanocelulosa se trabajó con muestras de 5g de la celulosa extraída.

Figura 13.

Bagazo de piña recolectado de una juguería del mercado Modelo.

4.2.3. Muestreo

Se determinó que la muestra a estudiarse es no probabilística, porque se desconoce la cantidad de celulosa y nanocelulosa que se obtendrán, por lo cual la selección de la muestra se tomará a conveniencia de los analistas.

4.3 Técnicas, equipos y materiales

4.3.1 Técnicas

La técnica que se utiliza es de observación y experimentación.

4.3.2 Materiales, equipos

4.3.2.1 Proceso de recolección, acondicionamiento y pre-tratamiento de la materia prima

El bagazo de piña es la materia prima designada para el proyecto, por su composición lignocelulósica. Esta materia prima se recolecta de los diversos comercios de juguerías que hay en el mercado modelo de Chiclayo y se procederá al traslado hacia el laboratorio de Investigación de la facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, el traslado del bagazo se realiza en un contenedor con hielo para la conservación de esta y evitar una proliferación de bacterias que puedan afectar el resultado final.

4.3.2.1.1 Secado inicial. Para facilitar el proceso de molienda y tamizado, prepararemos un secado de nuestra materia prima, la cual será en una estufa del laboratorio a una temperatura de 65°C y un tiempo de 45 min. “

4.3.2.1.2 Molienda y tamizado. Realizamos la molienda de la materia prima, conforme transcurra el tiempo necesario, está será removida del molino a usar y se continuará con el proceso de tamizado, para separar las partículas de distinto tamaño, este proceso se realizará las veces que sean necesarias hasta mantener un producto uniforme. El proceso se realizará de acuerdo con los equipos y materiales descritos en la **tabla 4**.

Tabla 4.

Molienda y tamizado del bagazo de piña.

Equipos/materiales	Materia prima
Molino universal IKA M 20	Bagazo de piña
Estufa de secado BINDER	
Columna de tamices ROTAP RX-29	
Balanza analítica de precisión ADVENTURER	

4.3.2.1.3 Pre-tratamiento del bagazo. Para la eliminación de cualquier sustancia soluble en agua que pueda existir en la materia prima, se realiza un lavado con agua destilada a una temperatura de 75°C por unas 4h en relación de fibra/agua 1:10, luego se filtra y se pone a secar en un deshidratador o estufa a la temperatura de 65°C durante unas 20 h, finalmente se resguarda en bolsas herméticas para evitar ingreso de bacterias, humedad, etc.

4.3.2.2 Proceso de extracción de la celulosa

Para obtener la celulosa, se realizará en base a dos factores previamente definidos: Concentración de hidróxido de sodio y temperatura de cocción, por lo cual se obtendrán 6 pruebas a realizar.

Figura 14.

Diagrama de flujo de la extracción de celulosa del bagazo de piña

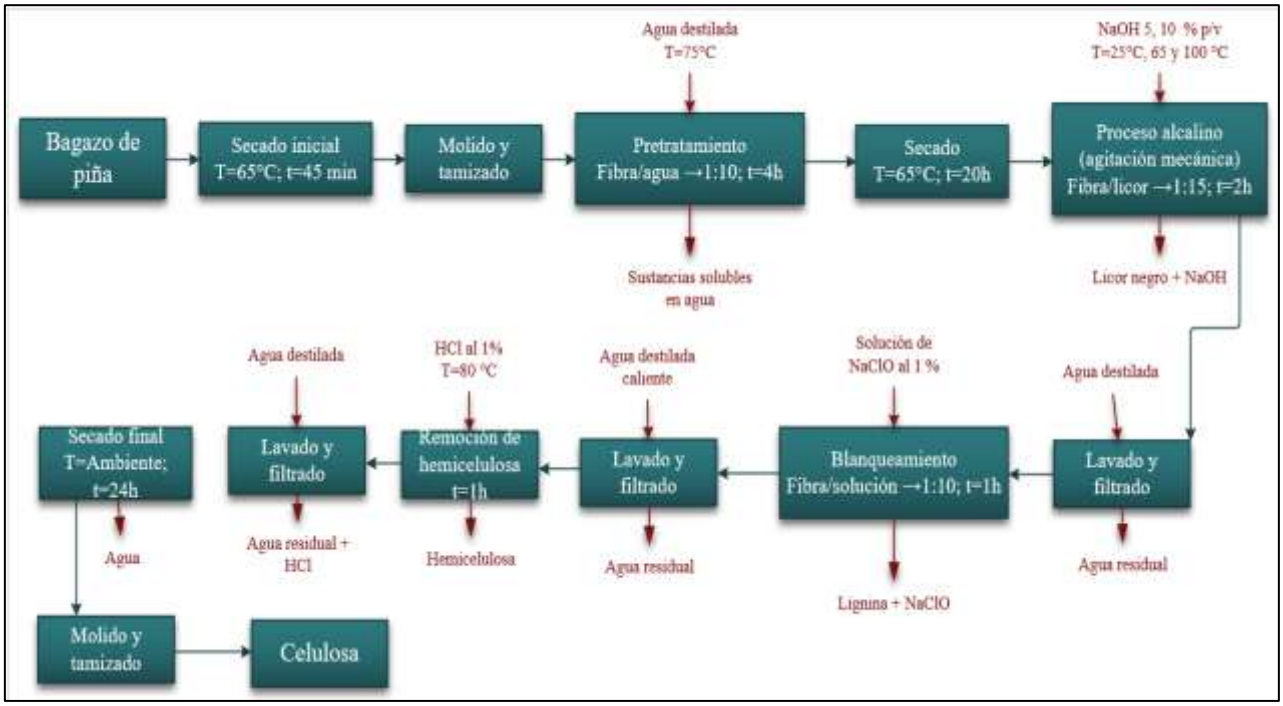


Tabla 5.

Proceso de extracción de la celulosa del bagazo de piña.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Vasos de precipitación ➢ Papel filtro Whatman grado 42 ➢ Termómetro Industrial ➢ Columna de tamices ROTAP RX-29 ➢ Reverbero ➢ Varilla de agitación ➢ pHmetro HANNA	➢ Hipoclorito de sodio ➢ Hidróxido de sodio ➢ Ácido clorhídrico ➢ Agua
Procedimiento	

Después de la recolección, acondicionamiento y pre-tratamiento de la materia prima, en este caso el bagazo de piña, continuamos con el proceso alcalino o hidrólisis alcalina, en la cual tomamos 42 gr de bagazo en polvo, lo seccionamos en muestras de 7gr para cada tratamiento y tratamos por 2h según los parámetros establecidos (NaOH al 5 y 10 %) y temperaturas según el tratamiento, una vez acabada el tiempo de reacción, la solución obtenida se filtró, presenciando la extracción de la celulosa de una colorimetría amarronada, esto debido a la lignina y licor negro presente.

Lo filtrado se lavó con abundante agua destilada hasta que el agua de lavado logre alcanzar un pH neutro.

La pulpa de celulosa obtenida aun presentó lignina que debía eliminarse, por lo cual se optó por un proceso de blanqueamiento con una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 1%, en una relación fibra/solución 1:10, con duración de 1h a 90°C y a continua agitación, se realizó este procedimiento 2 veces para un mejor resultado. Por consiguiente, para la eliminación de hipoclorito de sodio residual, la celulosa se filtró y lavó con agua destilada calentada hasta que el agua de lavado logre alcanzar la neutralidad.

Por último, la celulosa obtenida y blanqueada se le realizó con ácido clorhídrico (HCl) al 1% un tratamiento de 1h a 80 °C, para la eliminación de hemicelulosa, luego se lavó con agua destilada caliente nuevamente para remover el exceso de HCl, se filtró y ya con la celulosa extraída y tratada se procedió al secado a temperatura ambiente, con un tiempo aproximado de 1 día entero y 4h más en un deshidratador de alimentos, para proceder a molerlo hasta volverlo polvillo y que pase por el tamiz más pequeño. Finalmente se resguardó en recipientes etiquetados correctamente.

4.3.2.3 Obtención de nanocelulosa

Se realiza la obtención de nanocelulosa por aplicación de una hidrólisis ácida (Ácido sulfúrico al 62% y 70%) la cuál será acompañada con ultrasonidos de alta intensidad. Se obtendrán 2 muestras de nanocelulosa. El proceso se describe en la figura 15.

Figura 15.

Diagrama de flujo de la obtención de nanocelulosa del bagazo de piña por hidrólisis ácida.

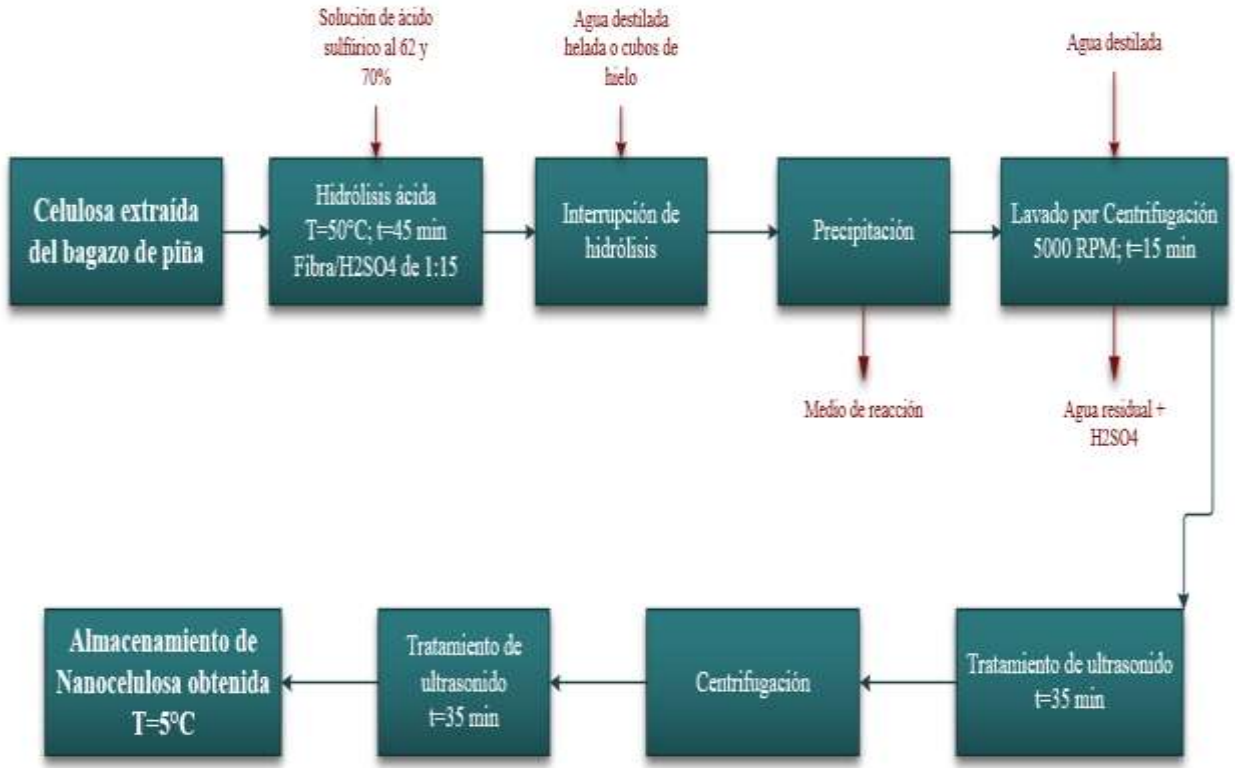


Tabla 6.

Proceso de obtención de la nanocelulosa del bagazo de piña por el proceso de hidrólisis ácida.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Celulosa del bagazo de piña	➢ Ácido sulfúrico
➢ Centrífuga refrigerada PrO-Analytical	➢ Agua destilada

- Termómetro Industrial
- Equipo de ultrasonido UCP-10
- Vasos de precipitación
- Agitador magnético con calentamiento VELP SCIENTIFICA
- Phmetro HANNA
- Balón aforado
- Cubeta para hielos
- Secador de convección forzada

Procedimiento

De la celulosa que se extrajo, se pesó y colocó 5 gramos de esta en un vaso de precipitación de capacidad de 500 ml y se añadió una solución de ácido sulfúrico al 62% p/p, con la relación propuesta de 1:15 fibra/H2SO4, este vaso se mantuvo en un agitador magnético durante 50 min vigilando que la temperatura permanezca entre los 45°C, sin excederlo.

Al acabar el tiempo de reacción propuesto, se detuvo la hidrólisis agregando 210 ml de cubos de hielo de agua destilada. Se reposó hasta que se visualizó una precipitación y al finalizar, se eliminó con cuidado el medio de reacción tratando de no perder el precipitado.

Se procedió una remoción del exceso de ácido sulfúrico presente hasta llegar a un pH neutro, para ello se centrifugó la muestra a 5000 rpm durante 15 min, con una repetición de 5 veces como mínimo, teniendo como resultado también un sedimento separado con aspecto de gel, el cual se diluyó con agua destilada.

Para un mejor resultado con respecto al tamaño, la nanocelulosa se sometió a un tratamiento de ultrasonido, a 40 kHz de frecuencia y 300 watt. Durante 35 min a 50% de amplitud y un baño de hielo para evitar las altas temperaturas causadas por una desulfuración.

Continuamos con una centrifugación de la suspensión obtenida, y un tratamiento adicional de ultrasonido por 20 min.

La suspensión final, se almacenó en un refrigerador a una temperatura entre los 5 °C.

El mismo procedimiento se realizó con el ácido sulfúrico a una concentración de 70 %.

4.3.2.3 Caracterización de materia prima

La caracterización de la materia prima fue determinada siguiendo métodos y procedimientos encontrados en la literatura

4.3.2.3.1 Contenido de humedad. El contenido de humedad del bagazo de piña se determina mediante la norma TAPPI T 12 os-75, que es un método de ensayo para evaluar la cantidad de agua contenida en una masa.

Tabla 7.

Método para determinar el % de humedad en el bagazo de piña

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Balanza analítica de precisión ADVENTURER ➢ Estufa de secado BINDER ➢ Desecador ➢ Cápsula de porcelana	➢ 20 gramos de muestra
Procedimiento	
• Se pesará 10 gramos de la muestra. • Se colocará la muestra pre pesada en la cápsula • Se ingresará la cápsula con la muestra a la estufa y se deberá calentar a 105° ± 2°C en un tiempo de 2 hrs. • Se retirará la capsula de la estufa y posteriormente se tapará la cápsula en donde se trasladará hacia el desecador hasta que este alcance la temperatura ambiente (25°C) en un tiempo aproximado de 25 a 40 minutos. • Se repetirá hasta que el peso sea constante. El % de humedad se calculará mediante la siguiente ecuación: $$\% \boldsymbol{Humedad} = \frac{(\boldsymbol{W1} - \boldsymbol{W2})}{\boldsymbol{W1}} \boldsymbol{X}\ \mathbf{100}$$ Donde: W1: Peso inicial de la muestra en gr.	

W2: Peso de la muestra seca en gr (Peso de la capsula con la muestra seca – peso de la cápsula)

Nota. Inicialmente, se había contemplado emplear la norma TAPPI T 12 os-75 para la determinación del contenido de humedad del bagazo de piña. Sin embargo, debido a la cantidad limitada de materia prima que se obtiene al finalizar los procesos iniciales (acondicionamiento y pre-tratamiento), se determinó que el uso de una termobalanza presente en el laboratorio de investigación, que requiere menor cantidad de muestra, era más adecuado para este estudio. Este ajuste permitió obtener resultados precisos y replicables, optimizando el uso de los recursos disponibles.

4.3.2.3.2 Contenido de ceniza. El contenido de ceniza en el bagazo de piña se determinará utilizando la norma TAPPI 15 os-58, es un método para determinar el contenido de ceniza que se refiere al residuo incombustible después de la calcinación

Tabla 8.

Método para determinar el % de ceniza en el bagazo de piña.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Balanza analítica de precisión ADVENTURER ➢ Mufla PROTHERM ➢ Desecador ➢ Crisol de porcelana ➢ Espátula ➢ Pinzas	➢ 10 gramos de muestra
Procedimiento	
• Se pesó el crisol vacío. • Se adicionó los 3 gramos de la muestra al crisol y se volvió a pesar • Se introdujo el crisol a la mufla a 575 °C durante 3 horas hasta llegar a calcinarla • Se retiró de la mufla y posteriormente se introdujo en el desecador durante un tiempo promedio de 15 minutos a temperatura ambiente para evitar la absorción de humedad de las cenizas. • Pesar de nuevo: Se volvió a pesar el crisol con la muestra calcinada hasta tener un constante de ceniza.	

El % de cenizas se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\% \, \boldsymbol{Cenizas} = \frac{(\boldsymbol{Peso\ muestra\ calcinada - Peso\ crisol\ vacio})}{\boldsymbol{Peso\ inicial\ de\ la\ muestra}} \boldsymbol{X\ 100}$$

4.3.2.3.3 Determinación de lignina. Para determinar el contenido de lignina en el bagazo de piña se empleó el método descrito en la norma TAPPI T 222 os-74.

Tabla 9.

Método para determinar el % de lignina en el bagazo de piña.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Matraz Erlenmeyer de 100 y 1000 ml ➢ Vidrio de reloj ➢ Balanza analítica de precisión ADVENTURER ➢ Papel filtro WHATMAN GRADO 42 ➢ Plancha calentadora THERMO SCIENTIFIC ➢ Estufa de secado BLINDER ➢ Agitador magnético con calentador VELP SCIENTIFICA ➢ Vaso de precipitación de 100 y 1000 ml	➢ H_2SO_4 al 72 % ➢ Agua destilada
Procedimiento	
➢ Se colocó 1 gramo de muestra seca en un matraz Erlenmeyer de 100ml y se mezcló 15 ml de H_2SO_4 al 72 %.	

- Una vez mezclada la muestra se cubrió el matraz con un vidrio de reloj, se colocó en un agitador magnético y se mantuvo con agitación constante por 2 horas a temperatura ambiente.
- Posteriormente se trasladó la muestra a un vaso de precipitación de 1 L y se diluyó al 3% adicionando 573 ml de agua destilada.
- La muestra se hirvió por 4 horas, manteniendo un volumen constante con la adición de agua caliente frecuentemente.
- Se colocó en un papel filtro y luego se trasfirió la lignina precipitada, lavándose con agua caliente posteriormente
- Finalmente se secó en un horno a 105 ± 3 °C el papel filtro hasta que el peso fue constante.

El % de lignina se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\% \boldsymbol{Lignina} = \frac{(\boldsymbol{Peso\ de\ lignina\ x\ 100})}{\boldsymbol{Peso\ seco\ en\ horno\ de\ la\ muestra\ en\ gramos}}$$

Donde:

Peso de lignina: Peso del recipiente con lignina – Peso del recipiente

4.3.2.3.3 Solubilidad en agua caliente. Con la finalidad de determinar la solubilidad en agua caliente se empleará la norma TAPPI T 207 cm – 99, es muy importante porque elimina y determina componentes solubles en agua como elementos orgánicos, almidones, azúcares y colorantes presentes en el material lignocelulósico.

Tabla 10.

Método para determinar el % de solubilidad del agua en el bagazo de piña

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Matraz Erlenmeyer de 500 ml ➢ Varilla de vidrio ➢ Desecador ➢ Agitador magnético con calentador VELP SCIENTIFICA ➢ Estufa de secado BLINDER ➢ Balanza analítica de precisión ADVENTURER ➢ Papel filtro WHATMAN GRADO 42	➢ Agua destilada

Procedimiento

- Se colocó 10 gramos de muestra en un matraz de 500 ml y se adicionó 300 ml de agua destilada caliente.
- Se condensó hirviendo la solución durante 3 horas para lo cual se dejó en un agitador magnético, para mantener el volumen constante se adicionó cada cierto tiempo agua caliente.
- Posteriormente se filtró y se lavó con agua destilada caliente.
- Para finalizar se secó a 105 °C hasta que el peso fue constante y se colocó en un desecador para enfriarlo antes de pesarlo, evitando así que este absorbiera humedad.

  El % de Solubilidad en agua se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\%\,\boldsymbol{Solubilidad\ en\ agua} = \frac{(\boldsymbol{\alpha} - \mu)\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{100}}{\boldsymbol{a}}$$

  Donde:

  α: Peso inicial de la muestra en gr

μ: Peso seco de la muestra en gr

4.3.2.4 Caracterización de celulosa

4.3.2.4.1 Determinación del rendimiento del % celulosa. Para hallar el rendimiento del % de celulosa se da entre la relación de la masa obtenida cuando se aplica en el método y la cantidad de masa empleada el inicio del método.

El % de rendimiento de celulosa se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\%\,Rendimiento = \frac{Peso\ celulosa\ extraida}{Peso\ del\ bagazo\ de\ piña}\ x\ 100$$

4.3.2.4.2 Determinación del alfa celulosa. El contenido del alfa celulosa en el bagazo de piña se determinará mediante la norma TAPPI T 203 cm-99, en donde indica que el contenido de alto peso de celulosa no degradado en la pulpa durante el tratamiento alcalino.

Tabla 11.

Método para determinar el % de alfa celulosa del bagazo de piña.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Vaso de precipitación de 300 ml ➢ Kitasato de 2000 ml ISOLAB ➢ Papel filtro WHATMAN GRADO 42 ➢ Bomba de vacío VACUUBRAND ➢ Estufa de secado BLINDER ➢ Varilla de vidrio para agitar ➢ Probeta de 100 ml	➢ 25 ml de hidróxido de sodio en solución con una concentración de 8.8% p/v ➢ 100 ml de hidróxido de sodio en solución con una concentración de 17.5% p/v ➢ 40 ml de ácido acético en solución al 10%.

- Balanza analítica de precisión ADVENTURER
- Embudo Buchner
- Vidrio de reloj
- Agua destilada

Procedimiento

Se colocó y pesó 0.5 gr de muestras en la balanza analítica y posteriormente se vertió en un vaso de precipitación de 300 ml.

La pulpa seca del bagazo de piña se humedeció en 25 ml de hidróxido de Sodio (NaOH) en solución con una concentración de 17.5% y con la varilla de vidrio se agitó lentamente durante 1 minuto y 30 segundos, se adicionaron 15 ml más de NaOH al 17.5 % y se mezcló por el mismo tiempo, posterior a esto se le agregó de nuevo 15 ml de NaOH, después se dejó reposar por 3 minutos, se volvió a añadir 15 ml de NaOH más y se mezcló con la varilla de vidrio por 10 minutos, luego se vertió 30 ml de NaOH en 3 tramos de 10ml de NaOH en lapsos de 2.5 min, 5 min, 7.5min, respectivamente, posterior a esto con el vidrio de reloj se cubrió el vaso de precipitación sin sacar la varilla durante 30 minutos.

Se añadió 100 ml de agua, de manera rápida, se mezcló de manera eficaz y se dejó diluir por 30 minutos.

Se añadió el contenido de la muestra al embudo Buchner que se encuentra en conexión con el matraz de succión y se procedió a realizar la filtración al vacío. Se lavó el vaso y el residuo con 25 ml de hidróxido de Sodio (NaOH) en solución con una concentración de 8.8%, posteriormente se lavó el residuo que se filtró utilizando 50 ml de agua destilada en 5 porciones de 10 ml.

Con 400 ml adicionales de agua destilada, se lavó el residuo, desconectando el tubo de succión para así poder llenar el embudo con 50 ml de ácido acético en solución al 10%, dejando humedecer el residuo por 5 minutos, luego se procedió a eliminar el ácido acético utilizando succión y se lavó el residuo con agua destilada hasta quitar la acidez. Finalizando el proceso se desconectó el equipo de succión y con cuidado se retiró el papel filtro con el residuo, el cual se procedió a secar en la estufa a una temperatura de 105°C hasta que el peso sea constante. El residuo es el % de alfa celulosa que contiene la muestra. El % de rendimiento de alfa celulosa se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$\%\ \boldsymbol{Alfa\ Celulosa} = \frac{\boldsymbol{a2}}{\boldsymbol{a1}}\ \boldsymbol{x\ 100}$$

Donde:

a 1: Peso inicial de la muestra seca antes del análisis

a 2: Peso final de la muestra seca antes del análisis

4.3.2.5 Caracterización de la nanocelulosa

4.3.2.5.1 Transmitancia óptica. Para el análisis de la transmitancia óptica se usó el espectrofotómetro UV GENESYS 30 que se encuentra en el laboratorio de investigación, el cual mide la transmitancia de la nanocelulosa diluida en 0,1%, en rangos de longitud de 400 – 800 nm.

Tabla 12.

Método para determinar la transmitancia de la nanocelulosa.

Materiales y equipos	Reactivos

➢ Celda de Cuarzo de 1 cm ➢ Toalla absorbente ➢ Espectrofotómetro UV GENESYS 30	➢ Agua destilada
Procedimiento	
Encender el equipo, pero antes debemos tener las muestras preparadas que se van a analizar. Se configurará los datos que te pide el equipo. Con agua destilada se hizo la medición del blanco. Se procedió a colocar la muestra dentro de la celda de cuarzo y con la toalla absorbente se limpiaron las paredes de la celda con el fin de evitar algunas interferencias cuando se esté analizando la muestra Se procedió a ubicar en el compartimiento de muestras la celda de cuarzo. Se realizó la medición y se registraran los valores de transmitancia de la muestra.	

4.3.2.5.2 Apariencia de las fibras. Las muestras del bagazo de piña, la celulosa y la nanocelulosa se observaron en el microscopio óptico OLYMPUS CX31 del laboratorio de investigación de la facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, con la finalidad de ver estructuras que no están a la vista.

Tabla 13.

Método para observar la estructura de las muestras.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Microscopio óptico OLYMPUS CX31 ➢ Porta y cubre objeto	

Procedimiento
➢ Encender el microscopio óptico y limpiar el portaobjeto. ➢ La muestra se colocó en el portaobjetos y esta se arregló en la platina del microscopio. ➢ Se ajustó la posición de la platina hasta encontrar la estructura a visualizar. ➢ Se probó los lentes los lentes del microscopio hasta determinar en donde se visualizaba mejor la muestra. ➢ Se tomó las fotos necesarias de las muestras analizadas. ➢ Retirar el portaobjetos de la platina y apagar el equipo

4.3.2.5.2 Determinación de parámetros funcionales mediante la espectroscopía de infrarrojo

Tabla 14.

Método para determinar grupos funcionales con espectroscopía de infrarrojo.

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Espectrofotómetro infrarrojo PERKIN-ELMER ➢ Pipeta ➢ Algodón	➢ Alcohol
Procedimiento	
➢ Encender el Espectrofotómetro de infrarrojo ➢ Se ejecutará la programación Manager Spectra y se escogerá Quick-Star. ➢ Posteriormente se limpiará con algodón y alcohol, la parte interior del equipo donde se pondrá la muestra.	

- Después de inspeccionar y verificar que no haya sustancias en el ambiente de la muestra, se procederá a realizar el "Background", en donde se pasara a cerrar la tapa herméticamente y presionar el botón de inicio del equipo.
- Luego se abrirá la tapa nuevamente del equipo y se realizará el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal, posterior a eso se quitará y se traerá hacia adelante el tornillo de ajuste, hasta que muestre fricción, se cerrará la tapa y se dará inicio.
- Procesar el espectrofotómetro utilizando el programa Spectra Analysis, corrigiendo las escalas, seleccionando y eliminar el CO2.
- Identificar los puntos elevados más relevantes representados en la gráfica.
- Guardar los datos del espectrofotómetro para analizarlos posteriormente
- Por último, se abrirá la tapa del equipo, se desajustará el tornillo y se limpiara con alcohol y algodón el área donde se colocó la muestra.
- Finalizar los programas empleados y apagar el equipo.

4.3.2.5.3 Microscopio electrónico de barrido (SEM). Se utilizará un microscopio de barrido, donde las muestras de celulosa y nanocelulosa serán examinadas para visualizar su morfología.

Para la visualización en el microscopio, las muestras, que deberán secarse previamente, se colocaran en un porta muestras de aluminio de forma circular, similar a un microscopio, y para la observación se utilizará una tensión de 15,0 kV.

Tabla 15.

Procedimiento para el uso del Microscopio electrónico de barrido (SEM).

Materiales y equipos	Reactivos
➢ Microscopio SEM ➢ Cinta de Carbono ➢ Porta muestras de aluminio	

Procedimiento

- Tener las muestras listas que se analizaran
- Realizar la colocación de las muestras que se analizaran en la cámara SEM
- Se procede a la generación del vacío
- Se determinará el voltaje
- Se enfocará en el interés de la estructura
- Los parámetros del SEM se optimizarán
- Luego se obtendrán las imágenes de las muestras analizadas
- Como último paso se guardarán las imágenes en USB o CD

Nota. Debido a la falta de disponibilidad de un microscopio SEM en Chiclayo, así como los altos costos asociados para acceder a uno, se utilizó el microscopio óptico OLYMPUS CX31 disponible en el laboratorio de investigación siguiendo la recomendación del asesor de investigación. Esta herramienta fue adecuada para los objetivos del estudio dentro de las limitaciones existentes.

4.4 Ajuste metodológico basado en la experimentación

Durante la ejecución experimental, se evidenció una perdida significativa de la materia prima aplicando el secado inicial y que la continuación de los siguientes procesos se dificulte por la condición de secado obtenido. Por ello, se modificó el protocolo, priorizando empezar con el pretratamiento detallado en la metodología. El bagazo de piña fue lavado con agua destilada a 75 °C durante 4 horas, con una relación fibra/agua de 1:10. Luego, se filtró y secó en deshidratador de alimentos perteneciente a la escuela de Industrias Alimentarias, a una temperatura de 65 °C durante 20 horas. Finalmente, se realizó la molienda y tamizado, y el material fue almacenado en bolsas herméticas.

Este ajuste metodológico permitió conservar mayor cantidad de materia prima y optimizar la operatividad del proceso experimental.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Caracterización de materia prima

5.1.1 Composición química

El bagazo de piña (Ananas comosus), materia prima de la investigación, paso por diversos análisis químicos propuestos para obtener resultados visualizados en la siguiente tabla de su composición.

Tabla 16.

Composición química del bagazo de piña.

ENSAYO	METODO	%
Humedad	Termobalanza	83.80
Ceniza	TAPPI 15 os-58	0.964
Lignina	TAPPI T 222 os-74	17.145
Celulosa	TAPPI T 203 cm-99	23.913
Solubilidad en agua Caliente	TAPPI T 207 cm – 99	26.455

Con respecto a la celulosa extraída del bagazo de piña, materia prima de la investigación, resultó en un 23.913%. Debido a la poca información rescatada de diversas fuentes, el aproximado contenido de material celulósico en el bagazo de piña es del 24.53 ± 1.68, según la literatura de Amores et al. (2022). El contenido de fibra dietética reportado para la variedad Golden, variedad usada para la investigación por ser una fruta de estación, fue de 0.79%, dato reportado según Paz Cedeño (2015), lo que refleja una escasa presencia de polisacáridos estructurales como la celulosa. Este valor, inferior al observado en otras

variedades o en partes lignificadas de la planta, sustenta el bajo rendimiento de celulosa y nanocelulosa obtenido a partir del bagazo procesado.

Al comparar el contenido de celulosa del bagazo de piña de nuestra investigación, con diferentes literaturas del mismo índole, alternativas diversas al uso de fibras madereras como: cáscara de naranja 9.6 % Romero Bernal & Vergara Pineda (2023), 21.80 ± 0.22% del residuo trillado de cebada y 28.33 ± 1.73 de la cáscara (Rojas et al. (2014) y con 16.2% en el desecho de hojas de té según Rahman et al. (2017), resulta que obtuvimos un porcentaje mayor por lo cual es una materia prima potencial para los diversos usos de la celulosa.

En esta investigación se obtuvo un contenido de celulosa total del 23.913% a partir del bagazo de piña variedad Golden, tras un tratamiento alcalino inicial. Posteriormente, al aplicar el método para la determinación de α-celulosa, se identificó que el 58.798% de esa celulosa extraída corresponde a la fracción que permanece insoluble en soluciones concentradas de hidróxido de sodio. Este tipo de celulosa, conocida como α-celulosa, está asociada a estructuras de alto peso molecular y alto grado de cristalinidad, características que le otorgan una mayor resistencia a la degradación química.

La presencia de una fracción significativa de α-celulosa sugiere que el bagazo de piña puede considerarse una materia prima prometedora para aplicaciones industriales que requieren celulosa de alta pureza. Por lo tanto, su uso en la obtención de nanocelulosa es viable.

Con respecto al contenido de humedad presente en el bagazo de piña resulto ser de 83.80%, hay que tener en cuenta que la piña es una fruta con un gran contenido de líquido, dato acertado al notar el porcentaje de humedad obtenido, en el caso del contenido de lignina,

se obtuvo un 17.145%, dato comparable con la investigación sobre residuos lignocelulósicos similares según Rojas-Gonzáles et al. (2018), con resultados de 19.45 ±0.02 de la cáscara de maracuyá, 17.99±0.01 de la cáscara de tomate de árbol, entre otros.

En el contenido de ceniza se obtuvo un resultado de 0.964%, esto debido al acondicionamiento y pre-tratamiento previo, lo que resalta una baja presencia de minerales y es deseable en aplicaciones donde se busca una alta pureza de celulosa, como en la producción de papel o biopolímeros, ya que reduce la necesidad de procesos adicionales de purificación.

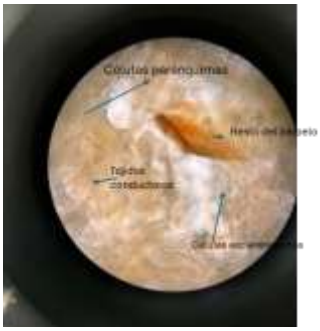
El análisis de solubilidad en agua caliente del bagazo de piña mostró un valor de 26.455%, lo cual refleja una proporción considerable de compuestos hidrosolubles presentes en la muestra. Este valor se encuentra en un rango similar al reportado por las normas TAPPI en fibras no madereras de un rango de 15-30%.

5.1.2 Apariencia de las fibras

Se tomo una muestra fresca del bagazo de piña recolectado de las juguerías del mercado Modelo, la cual se dispuso en el portaobjetos del microscopio óptico OLYMPUS CX31 y se visualizó su morfología.

Figura 16.

Imagen visual obtenida del microscopio óptico del bagazo de piña.



En la imagen se observa presencia de tejidos conductores (xilema y floema), las cuales transportan agua, minerales y azúcares producidos en la fotosíntesis (Megías et al., s.f.).

Durante el análisis microscópico del bagazo de piña se visualizó las estructuras de parénquima y esclerénquima. Según Villalva, 2021 el parénquima es el tejido fundamental que se localiza en casi todos los órganos vegetativos, está compuesto por células de las mismas dimensiones, cuya función principal es el almacenamiento y transporte de sustancias dentro del tejido vegetal. En contraste, según Sánchez-Leonel et al., 2023 el esclerénquima debido a que está conformado por células con paredes lignificadas, lo cual lo vuelve un tejido más rígido que se encuentra en múltiples partes de plantas cuya función es el sostén y soporte del material vegetativo.

El bagazo de piña paso por un proceso mecánico, por lo cual se percibe así la estructura, lo cual ayuda a que los tejidos vasculares, los carpelos y el corazón de la piña sean procesados de una manera más eficiente.

5.2 Caracterización de celulosa

5.2.1 Extracción de celulosa

Se desarrolló en base a literaturas sobre el método de extracción de la celulosa según Phanthong et al. (2018) y Banu et al. (2021), un procedimiento descrito en la tabla 7 para la extracción de la celulosa, por lo cual se sometió a nuestro bagazo de piña recolectado a una serie de concentraciones de NaOH y temperatura, con la finalidad de elegir las mejores variables con el mejor rendimiento de celulosa y contenido de alfa-celulosa. Se presenta la tabla con los datos usados en el diseño experimental.

Tabla 17.

Factores usados para determinar el rendimiento de celulosa y contenido de alfa-celulosa

FACTORES	NIVELES		
Concentración de NaOH	5%		
	10%		
Temperatura de extracción	Temperatura ambiente	65 °C	100°C

Los resultados del rendimiento y contenido de alfa-celulosa obtenidos del diseño experimental en la extracción de la celulosa teniendo como materia prima el bagazo de piña, se muestran a continuación.

- Rendimiento de la celulosa extraída del bagazo de piña

El rendimiento de extracción de celulosa a partir del bagazo de piña representa la proporción de celulosa aislada en relación con la masa seca del material vegetal tratado,

después del proceso de hidrólisis básica con hidróxido de sodio y su posterior blanqueo con hipoclorito de sodio, con lo cual se elimina todos los compuestos innecesarios para la obtención de la celulosa. En la siguiente tabla, se presentan los resultados.

Tabla 18.

Resultados obtenidos del porcentaje de rendimiento de extracción de celulosa a partir del bagazo de piña.

TRATAMIENTOS	FACTORES		PESO EN GRAMOS		RESPUESTA
	NaOH (%)	T (°C)	Bagazo de piña	Celulosa extraída	Rendimiento (%)
T1	5	25.	7.0379	1.6758	23.810
T2	5	65	7.0287	1.6809	23.913
T3	5	100	7.0151	1.2045	17.170
T4	10	25.	7.0283	1.1079	15.763
T5	10	65	7.0327	0.9598	13.650
T6	10	100	7.0154	0.5081	7.243

- Porcentaje de contenido de alfa-celulosa de la celulosa extraída

Representa la pureza de la celulosa extraída presente en la materia prima de la investigación. A continuación, los resultados obtenidos presentados en la siguiente tabla.

Tabla 19.

Resultados obtenidos de la cantidad de alfa-celulosa presente en la celulosa extraída del bagazo de piña.

TRATAMIENTOS	FACTORES		PESO EN GRAMOS		RESPUESTA
	NaOH (%)	T (°C)	Muestra inicial	Muestra final	Alfa celulosa (%)
T1	5	25.	0.5975	0.3216	53.8
T2	5	65	0.5859	0.3445	58.798
T3	5	100	0.5644	0.1191	21.10
T4	10	25.	0.5540	0.2253	40.67
T5	10	65	0.5596	0.055	9.83
T6	10	100	0.5080	0.00011	0.022

5.2.2 Análisis estadístico

Se decidió aplicar un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de distintas concentraciones de hidróxido de sodio y temperaturas de extracción sobre el rendimiento (%) de celulosa obtenido del bagazo de piña y el contenido de alfa celulosa.

Se utilizó el análisis de varianza bifactorial con un nivel de significancia es decir alfa de 0.05. Comenzamos con la prueba de hipótesis y los dos supuestos:

- Hipótesis nula (H_0): Las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio y las temperaturas de extracción no generan diferencias significativas en los resultados obtenidos

- Hipótesis alternativa (H_1): Al menos una combinación de concentración de hidróxido de sodio y temperatura de extracción genera diferencias significativas en los resultados obtenidos.

Se procede a la verificación de las hipótesis supuestas comparando el nivel de significancia (α) con el valor p, teniendo así:

- Si p valor < α, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si p valor > α, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

Se presenta los resultados del ANOVA, en la siguiente tabla:

- Rendimiento de la celulosa extraída del bagazo de piña

Tabla 20.

Análisis de varianza del rendimiento de la celulosa extraída del bagazo de piña

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Concentración de NaOH	132.89	1	186.34	0.0053
Temperatura	67.80	2	47.53	0.0206
Error	1.43	2	—	—

Análisis del ANOVA:

- Resultados del ANOVA para rendimiento:

- Concentración de NaOH: p = 0.0053

- Temperatura: p = 0.0206

Se rechaza la hipótesis nula en ambos casos y se concluye que estos factores tienen un efecto significativo sobre el rendimiento.

Las mayores eficiencias se obtuvieron con 5% de NaOH y temperaturas más bajas (25–65 °C), mientras que a 100 °C el rendimiento disminuyó notablemente, sugiriendo una posible degradación parcial de la celulosa bajo condiciones extremas.

- Porcentaje de contenido de alfa-celulosa de la celulosa extraída

Tabla 21.

Análisis de varianza del porcentaje de contenido de alfa celulosa de la celulosa extraída

FUENTE DE VARIACIÓN	Suma de cuadrados	gl	F	p-valor
Concentración de NaOH	1153.04	1	6.51	0.1254
Temperatura	1384.09	2	3.91	0.2038
Error	354.23	2	—	—

- Resultados del ANOVA para porcentaje de alfa celulosa:

- Concentración de NaOH: $p = 0.1254$

- Temperatura: $p = 0.2038$

No se rechaza la hipótesis nula, indicando que no hubo diferencias significativas bajo los parámetros del experimento. Sin embargo, el tratamiento T2 (5% NaOH, 65 °C) mostró el mayor contenido de α-celulosa (58.798%), en contraste con T6 (10% NaOH, 100 °C), que registró apenas 0.022%. Esto sugiere que condiciones suaves favorecen la conservación de celulosa, mientras que condiciones extremas inducen su degradación. Con respecto al tratamiento T6, aunque químicamente coherente con las condiciones severas aplicadas (NaOH al 10% y 100 °C), introdujo un grado de variabilidad muy alto en el conjunto de datos. Esta

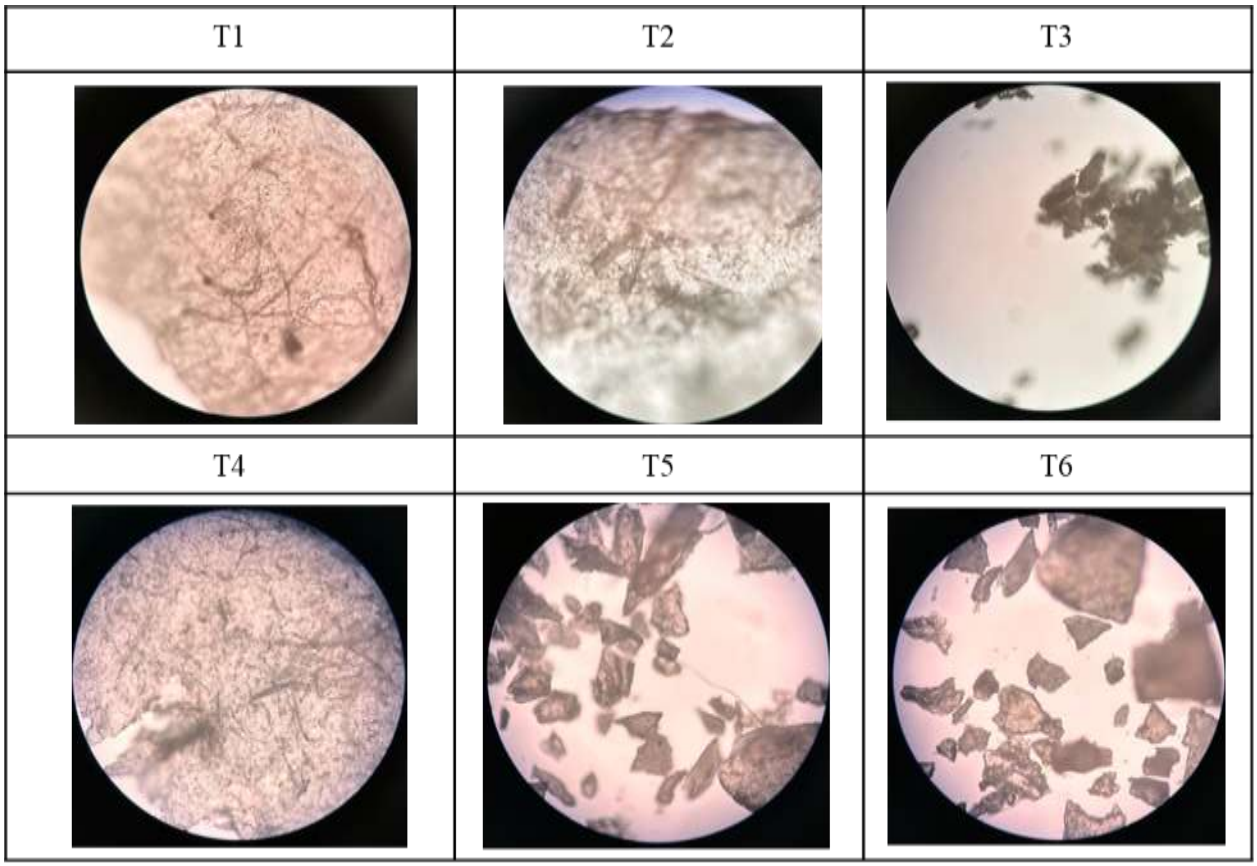
situación pudo haber influido negativamente en el análisis de varianza, al incrementar la varianza total y reducir la sensibilidad estadística del modelo, impidiendo detectar diferencias significativas pese a que existen tendencias claras entre tratamientos.

5.2.3 Apariencia de las fibras de la celulosa extraída

Se determinó la apariencia de las fibras de la celulosa extraída del bagazo de la piña con un microscopio óptico OLYMPUS CX31.

Figura 17.

Imagen obtenida del microscopio óptico de la celulosa en cada experimento.



Las observaciones obtenidas a través del microscopio óptico permitieron evaluar el efecto de las diversas condiciones de extracción sobre la morfología de la celulosa extraída. A bajas concentraciones de NaOH (5%) y temperaturas suaves (T1 y T2), las fibras celulósicas mostraron estructuras alargadas, delgadas y entrelazadas, conservando su forma natural y con buena dispersión. En cambio, al aumentar la temperatura (T3), las fibras comenzaron a degradarse, dando lugar a aglomerados amorfos y oscuros. Con tratamientos a 10% de NaOH, incluso a temperatura ambiente (T4), las fibras se presentaron más agrupadas y menos definidas, lo que indica cierta degradación. Con respecto al T5 y T6, en especial con el último mencionado, el material perdió su estructura fibrilar por completo, generando fragmentos irregulares y compactos, consistentes con una celulosa degradada. Estos resultados proponen que, al usar condiciones controladas o moderadas, en este caso de la hidrólisis y la temperatura favorecen una mejor conservación de la estructura celulósica del bagazo de piña.

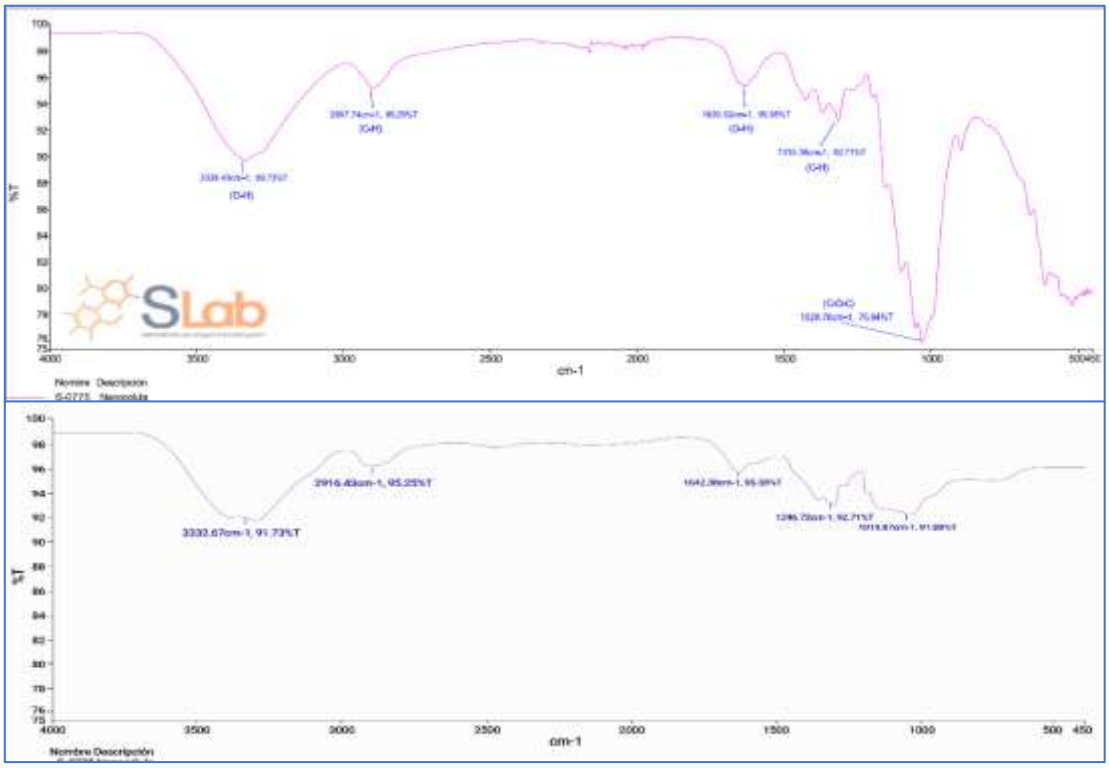
5.3 Caracterización de la nanocelulosa obtenida

5.3.1 Espectroscopía infrarroja

A continuación, se presentará el análisis de la espectroscopía infrarroja de la nanocelulosa tratada con una hidrólisis ácida al 62 y 70%, además de complementarlas con ultrasonido.

Figura 18.

Espectro FTIR de la nanocelulosa tratada al 62% y 70%.



Se observa picos dentro del rango de 3700-2976 cm-1, las cuales están coludidas con respecto a la vibración del enlace del grupo hidroxilo -0H, presentes en las moléculas de H_2O, continuando con los picos de 2900-2800 cm-1, corresponde a estiramientos simétricos de los grupos de compuestos alifáticos (Hernández et al. 2023).

Continuando con los picos en el rango de 1650-1640, refleja la flexión del enlace O-H del agua que ha sido adsorbida de la celulosa, lo cual marca como indicador su naturaleza higroscópica (Guo et al. 2018).

Los picos visualizados entre 1430-1420 cm^{-1} está asociada a la cristalinidad obtenida de la celulosa presente, la intensidad de esta definirá si su estructura se encuentra en orden y

si contiene más celulosa de tipo I. Mientras que en los picos entre 1316-1315 cm^{-1} se relaciona con las vibraciones de deformación de los grupos CH_2, los cuales están en relación con la estructura de la celulosa y su grado de orden en esta (Oh et al. 2005).

En el pico visualizado de 1246 cm-1, se denota la incorporación de grupos sulfatos a las nanofibras. Lo cual reporta Loelovich, 2012, Trache et al., 2020 y Yu et al., 2021, en sus investigaciones, que los grupos sulfatos, aunque estabilizan la dispersión coloidal, su presencia disminuye la estabilidad térmica y reduce la cristalinidad del material. Además, a mayor concentración de ácido se pueden generar compuestos carbonosos, furfural, o ácido levulínico, lo que provoca un oscurecimiento de la muestra y disminuye su calidad estructural y óptica.

Entrando a las bandas que se encuentran en un rango de 1163-1160 cm-1 está relacionado con el enlace glucosídico β(1→4) y vibraciones en el enlace éter C–O–C, lo cual en la estructura de la celulosa presente es esencial (Guo et al. 2018).

En el rango 1060-1000 cm-1 está asociado con la vibración del enlace C-O en los grupos alcohol de la celulosa, esto denotará los grupos funcionales característicos que se encuentran presentes. En cambio, para el rango de 897-896 cm-1 trata sobre la vibración β-glucosídica, la cual indica como característica de intensa presencia una celulosa del tipo I, de acuerdo con esta intensidad de esta banda se reflejará la proporción de regiones amorfas (Hospodarova et al. 2018). En el caso de la banda del tratamiento al 70% se puede observar una disminución de picos, hasta casi imperceptible, denotando amorfismo y degradación de la nanocelulosa.

5.3.2 Apariencia de las fibras de nanocelulosa

Se usó un microscopio óptico OLYMPUS CX31 presente en el laboratorio de investigación, para determinar la morfología de la nanocelulosa obtenida.

Figura 19.

Visualización de la nanocelulosa obtenida por hidrólisis ácida de cada tratamiento a través de un microscopio óptico.

NANOCELULOSA TRATADA	
1- Hidrólisis ácida al 62 %	2- Hidrólisis ácida al 70 %

En la visualización de la nanocelulosa obtenida mediante el proceso de hidrólisis ácida con ácido sulfúrico y combinado con tratamiento de ultrasonido se puede observar como en el tratamiento con la concentración de 62%, se observa la dispersión de las fibras, todo de manera homogénea, además de menos aglomeraciones y la reducción nanométrica de las fibras. Al aplicar la hidrólisis ácida, la fibra de celulosa pasara por un proceso en el cual se romperán las moléculas interfibrilares y generara la separación de la zona no-cristalina, así se formarán los cristales de nanocelulosa (Muñoz, 2018).

En cambio, en el tratamiento al 70%, se puede observar estructuras amorfas y heterogéneas. Con las fibras degradadas y presencia de turbidez, lo cual refleja aglomeraciones. Según lo observado se puede decir que la eficiencia fue limitada en la disgregación hacia una escala nanométrica. Por ello, en el rango de las bandas 800-900 cm-1 de la espectroscopía, el pico era imperceptible.

Al realizar una combinación del tratamiento de hidrólisis ácida con el de ultrasonido, se visualizó una mejora en la apariencia de la muestra, se tornó más homogénea, y fue más notoria la separación de las nanofibras, logrando así el resultado de una nanocelulosa óptima, resaltado en el caso del tratamiento con menor concentración de ácido, ya que la concentración de ácido es un factor en las dimensiones que tendrán las fibras y su rompimiento o disgregación de estas, estos detalles visualizados a través del microscopio óptimo complementan a lo descrito en los resultados de la espectroscopía infrarroja, ya que no se pudo complementar con el uso de un microscopio SEM por falta de recursos y disponibilidad del instrumento de laboratorio.

5.3.3 Apariencia

En la siguiente figura, se muestra las diferentes fases de la celulosa extraída del bagazo de piña para la obtención de la nanocelulosa

Figura 20.

Etapas de la celulosa hasta la obtención de la nanocelulosa

Celulosa	Nanocelulosa tratada	Nanocelulosa seca

Se puede observar la celulosa extraída finamente molida, para una mejor obtención de la nanocelulosa, esta tiene una apariencia de un tono blanquizco, ya que se optó por un blanqueamiento con hipoclorito de sodio en el proceso de la extracción de la celulosa, además de un proceso con ácido clorhídrico, estos dos procesos permitieron la eliminación de la lignina y hemicelulosa presente. En la investigación reportado por García-Alcocer et al., 2019 se evaluó el blanqueo de fibra de celulosa de paja de caña de azúcar, para eliminar la lignina y otros compuestos que dificulten la cristalinidad de la celulosa para la producción de papel artesanal, se comparó el hipoclorito de sodio al 0.5% y concentraciones de peróxido de hidrógeno. Los resultados mostraron que si bien el resultado de blancura del hipoclorito fue mayor (86.6%), los resultados del peróxido no estuvieron muy lejos también. La celulosa blanqueada presentó un aspecto blanquecino, característico del blanqueo lo cual lo vuelve adecuado para la elaboración de papel artesanal.

Asimismo, en la parte de nanocelulosa tratada, se observa los frascos con la nanocelulosa obtenida por hidrólisis ácida al 62% y 70% respectivamente, esta resulto ser de

una textura gelatinosa, con respecto al color, se percibe opaco a simple vista, al fijar dentro de la solución se podía divisar la nanocelulosa de un tono más claro al del líquido sobrenadante, se puede notar que en el proceso de mayor concentración se produjo una descomposición ácida de la celulosa, provocando esa tonalidad. Por último, se puede observar placas de la nanocelulosa obtenida, de una tonalidad entre blanquecina y crema.

Al revisar la literatura de Yu et al., 2021 este comenta que al aumentar la temperatura del proceso y tener una concentración mayor al 55% de ácido sulfúrico, este se carbonizará y tomará un aspecto oscuro. Este dato se comparte con lo visto en el frasco con la concentración del 70% de ácido el cual se oscureció por la reacción.

El estudio de Deng et al., 2022 nos relata la capacidad de las nanofibras de celulosa de poder formar redes tridimensionales mediante los enlaces de hidrógeno y entrelazamiento físico, teniendo como resultado hidrogeles con propiedades mecánicas y de retención de agua ajustables. Por ello la nanocelulosa que se obtuvo se visualizaba como un gel, mas notorio incluso durante las centrifugaciones.

5.3.4 Transmitancia de la nanocelulosa

Se muestra la tabla con los datos obtenidos de la transmitancia en cada tratamiento de nanocelulosa realizada.

Tabla 22.

Transmitancia de la nanocelulosa por hidrólisis ácida a 62 y 70% con ultrasonido.

NANOCELULOSA APLICADA	PORCENTAJE DE TRANSMITANCIA (%)

Nanocelulosa por hidrólisis ácida al 62% (NC-AS62U)	86.877
Nanocelulosa por hidrólisis ácida al 70 % (NC-AS70U)	69.113

Con respecto a cada tratamiento de hidrólisis ácida, se visualiza un aumento de la transmitancia con respecto al aumento de la concentración de ácido sulfúrico, en el caso del tratamiento realizado con 62 % y ultrasonido, los resultados en la transmitancia denotaron una baja absorbancia y buena dispersión óptica, lo cual se complementa con los resultados vistos en el FTIR y el microscopio óptico.

Por el contrario, en el caso de la muestra al 70% con ultrasonido se muestra ese resultado de transmitancia debido a mayor aglomeraciones, estructuras amorfas y turbidez, lo que quiere decir también que existen nanofibrillas degradas. Esto también fue confirmado a través del microscopio óptico.

5.4 Respuesta a los objetivos propuestos

Con respecto al objetivo general propuesto. el cual es obtener nanocelulosa a partir del bagazo de piña (Ananas Comosus) mediante el proceso de hidrólisis ácida, se obtuvo los siguientes datos que confirman su obtención:

Tabla 23.

Datos que respaldan y caracterizan la nanocelulosa obtenida en cada tratamiento.

Nanocelulosa	% de transmitancia	Espectroscopía infrarroja	Microscopio óptico
NC-AS62U	86.877	vibraciones en el enlace éter C–O–C, lo cual en la estructura de la celulosa presente es esencial, además de la presencia de picos en el enlace beta-glucosídica, lo cual es característico de las estructuras de nanocelulosa	Se muestra la homogeneidad, nanofibrilación o aglomeraciones y turbidez presentes en los tratamientos.
NC-AS70U	69.113		

Se comparó con otras literaturas e investigaciones ya propuestas de diversos materiales o residuos lignocelulósicos de origen no maderero, como Alfa fibers (Stipa tenacissima) en la investigación de El Achaby et al., 2018, el orujo de uva según Coelho et al., 2018, cáscaras de sagú según Naduparambath et al., 2018, entre otros, las cuales presentaron características similares que fueron corroborando nuestros datos, al no ser trabajado aún con el bagazo de piña en el proceso que hemos aplicado, hemos tomado en cuenta materias con rangos parecidos a los nuestros, pero en general los datos y rangos estipulados, han mantenido la verácidad de nuestra aplicación y resultados obtenidos.

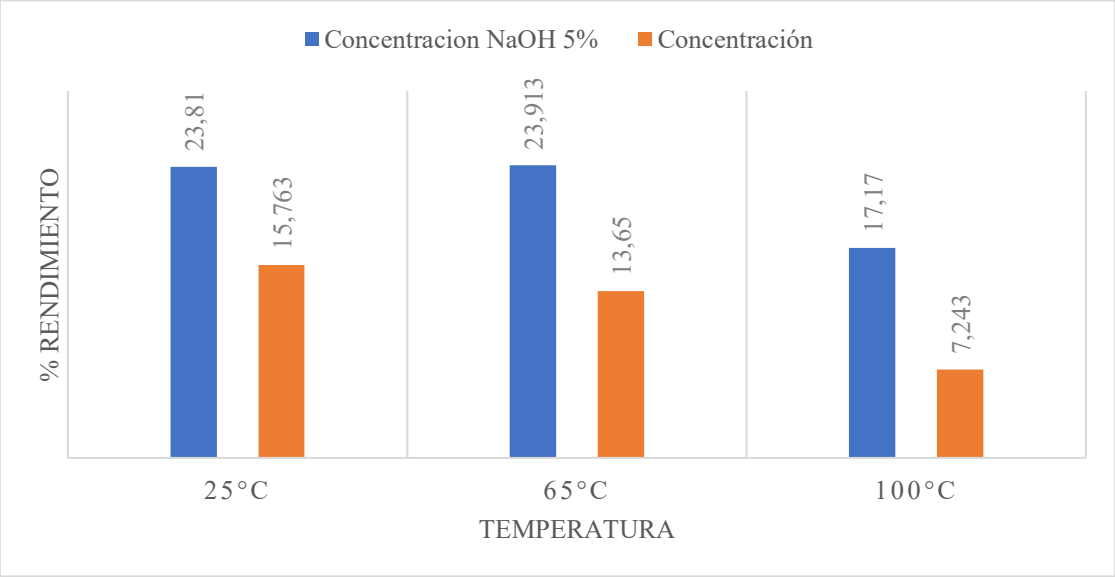
Continuando con los objetivos específicos se caracterizó nuestra materia prima, que fue el bagazo de piña recolectado de las juguerías del mercado Modelo, el cual la variedad usada en estas juguerías fue Golden, sus características lograron un resultado de: Humedad 83.80%, debido a que la piña es una fruta muy jugosa con respecto a la variedad usada, que además es conocido por su dulzor, ceniza 0.964%, por su una baja presencia de minerales,

lignina 17.145%, celulosa 23.913% y por último solubilidad en agua caliente con un porcentaje del 26.455, lo que indica que el bagazo de piña contiene una fracción significativa de azúcares libres, taninos y otros extractivos. Los datos obtenidos se describieron en la parte de composición química de la materia prima, que esta al inicio de nuestros resultados.

Se obtuvo el rendimiento de nuestra celulosa extraída del bagazo de la piña, por lo cual se realizó un gráfico mostrando y comparando los resultados.

Figura 21.

Gráfico del rendimiento calculado de la celulosa extraída en cada tratamiento



En el gráfico se puede observar que el rendimiento que se obtuvo de la celulosa varió drásticamente de 23.913 a 7.242 %, es decir fue disminuyendo conforme la concentración de hidróxido de sodio y la temperatura aumentaron, se produjo una degradación de la materia prima, confirmando esto con los datos del gráfico, como el porcentaje de 7.243 que resultó el

óptimo. En la investigación de Mesén et al.,2023, tuvo como factores a comparar la concentración y el tiempo, las cuales señaló influían en la degradación de las fibras.

Otro punto es, que al realizar los tratamientos se pudo visualizar que a mayor temperatura la celulosa se iba consumiendo y carbonizando, volviéndose de una tonalidad más oscura al resto y emanando un olor diferente, el aspecto se iba volviendo como el manjarblanco, específicamente refiriendo a los tratamientos realizados a 100°C.

Se determinó con estos resultados, que la condición más viable de los tratamientos realizados fue en el cual resalto un mayor porcentaje de rendimiento, señalado en el gráfico en el segundo tratamiento, con un porcentaje de 23.913, a una concentración de 5% de NaOH y una temperatura de 65°C.

Con lo previo visto, se confirma que el cálculo del porcentaje de rendimiento resulta ser una manera confiable y rápida de determinar que tratamiento tiene la mayor cantidad de respuesta, teniendo en cuenta los factores o condiciones que se tomen,

Por último, a partir de los resultados de la transmitancia, el FTIR y la caracterización morfológica con el microscopio óptico, se determinó que el tratamiento con mayor eficacia para la obtención de nanocelulosa fue el de 62%, fue el óptimo en resultados, teniendo en cuenta que el otro tratamiento sufrió un cambio brusco por la concentración de ácido, degradando la celulosa.

Según la literatura por Yu et al., 2021 al elevar el tiempo, la temperatura y la concentración de ácido, esto provoca que la hidrólisis ácida pueda ser más intensa, logrando cristales de un menor tamaño. Sin embargo, la intensidad también puede ser un factor muy variable, en el cual, si se excede en cierto grado, la cristalinidad se dañaría, la celulosa se

degradaría y la concentración de furfural aumentaría, disminuyendo el rendimiento de la nanocelulosa y generando más subproductos. Además, según Loelovich, 2012 comenta en su investigación, trabajar a una concentración de 70% de ácido a 25°C, la celulosa no se regenera por la despolimerización ocurrida y porque se forma moléculas de oligómeros que se diluyen en agua. Al trabajar a 45°C, se determinó que la celulosa se convierte en oligómeros solubles en 67% de ácido, la cristalinidad y el rendimiento son aún más bajos y la celulosa ya no se regenera.

VI. CONCLUSIONES

- Se logró obtener nanocelulosa a partir del bagazo de piña (Ananas comosus), por lo cual primero se extrajo la celulosa realizando el proceso de hidrólisis básica con hidróxido de sodio, en un total de 6 tratamientos, y con los resultados obtenidos de su rendimiento de celulosa y su contenido de alfa celulosa, se definió como un óptimo proceso, al tratamiento con una concentración de 5% de NaOH a una temperatura de 65°C, y con la relación de fibra/licor de 1:15 por 2 horas. Mientras que para la obtención de nanocelulosa se estableció como el tratamiento óptimo: Hidrólisis ácida al 62% a una temperatura de 50 °C por un tiempo de 45 minutos y con una combinación de ultrasonido por 60 minutos.

- Se aplicó 6 diferentes tratamientos para la extracción de la celulosa, que tuvo como rendimiento y contenido de alfa celulosa respectivamente: T1 (23.81% rendimiento y 53.8% alfa celulosa), T2 (23.913% rendimiento y 58.798% alfa celulosa), T3 (17.170% rendimiento y 21.10% alfa celulosa), T4 (15.763% rendimiento y 40.67% alfa celulosa), T5 (13.65% rendimiento y 9.83% alfa celulosa) y T6 (7.243% rendimiento y 0.022% alfa celulosa), lo que indicó que el mejor resultado en cuanto a rendimiento y pureza de la celulosa extraída fue del T2. Se identifico que, a condiciones más severas expuestas, los resultados pueden variar drásticamente, afectando así la extracción de material celulósico.

- Con respecto al contenido de alfa celulosa obtenida de la celulosa extraída (23.913%) pone de manifiesto que el proceso de extracción fue

suficientemente selectivo para remover componentes no deseados, como lignina y hemicelulosa, sin deteriorar en exceso la fracción cristalina de la celulosa. No obstante, un mejor control de variables como la concentración del reactivo y el tiempo de exposición de la muestra podría contribuir a optimizar aún más el rendimiento de α-celulosa en futuras investigaciones.

- Se realizó 2 muestras de nanocelulosa, en las cuales se obtuvo las siguientes características: Transmitancia por espectrofotómetro UV-vis de 86.877% (NC-AS62U) y 69.113% (NC-AS70U), señalando un óptimo rendimiento de nano fibrilación y homogeneidad en el tratamiento de nanocelulosa con H2SO4 al 62%, además de esta misma muestra suspendida se obtuvo una lámina consistente. Con la microscopia óptica se comprobó la presencia de nano estructuras celulósicas, por el aspecto dispersado y homogéneo de la muestra, mientras que en el análisis por espectroscopía de infrarroja se confirmó los grupos funcionales propios de la celulosa como: enlaces –OH, adsorción de agua, vibración en el enlace C-O-C del anillo de piranosa y picos en enlaces glucosídicos (β -glucosídica) que confirman la estructura de la nanocelulosa.

- En este estudio, no se obtuvieron resultados óptimos cuando se trabajó a 70 % de ácido sulfúrico, el proceso de hidrólisis fue muy severa por lo cual parte de la celulosa se degradó, se vio presencia de amorfismos y perdió cristalinidad.

VII. RECOMENDACIONES

- Cuando se trabaje con algún material lignocelulósico de consistencia menos fibrosa y con mayor cantidad de jugo, es preferible empezar con el pretratamiento (lavado), luego con los tratamientos físicos, para que así no se pierda mucha materia prima en el proceso.

- Para el tratamiento físico, la molienda de este tipo de materia prima es recomendable usar un molino más apto, como un molino de bolas o de martillos, para facilitar el proceso y rescatar la mayor cantidad de materia que pase por los tamaños más pequeños del tamiz.

- Para el secado del bagazo de piña, es más efectivo usar un deshidratador de alimentos antes que un horno o estufa, se evita el sobrecalentamiento de la materia y la carbonización.

- Traer los EPP's adecuados para el uso de los reactivos, porque pueden emitir gases tóxicos e irritantes, además de producir quemaduras.

- Al proceso de la hidrólisis ácida, se recomendaría evaluar otras condiciones, en base a la temperatura y la concentración, tomar en cuenta la reducción de la concentración del ácido sulfúrico y la temperatura.

- En el tratamiento de ultrasonido, se recomendaría realizar mayor número de repeticiones, para generar mayor dispersión y nano fibrilación de la celulosa.

- Continuar con la investigación del bagazo de la piña, la cual es un residuo muy frecuente en países tropicales, al constatar que se puede obtener nanocelulosa, se puede generar biopelículas o envolturas como una continuación de la investigación presentada.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Afanasjeva, N., Castillo, L. & Sinisterra, J. (2017), Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation, J. *Sci. Technol. Appl*., *3*, 27-43. https://doi.org/10.34294/j.jsta.17.3.22

Agraria. (Noviembre 8, 2023). *Mercado Mundial de la piña está en expansión*. [Editorial]. Obtenido de https://agraria.pe/noticias/mercado-mundial-de-la-pina-esta-en-expansion-33764

Agraria. (Junio 4, 2024). *Piña peruana llegó a 14 destinos en el primer trimestre del 2024, cuatro mercados más que en el primer trimestre del año pasado*. [Editorial]. Obtenido de https://agraria.pe/noticias/pina-peruana-llego-a-14-destinos-en-el-primer-trimestre-del--35963

AgroOrgánico. (Junio 1, 2020) En Perú, elaborarán empaques biodegradables con residuos de tuna y piña [Editorial]. https://agroorganico.info/en-peru-elaboraran-empaques-biodegradables-con-residuos-de-tuna-y-pina/

Alfaro Flores, S. R., Álvarez Quiroz, M. B., Asato Cerna, J. E., & Gonzalez Vasquez, J. A. (2024). NANOPARTÍCULAS DE CELULOSA: REVISIÓN SISTEMÁTICA. *Gestión De Operaciones Industriales, 2*(02), 8-20. https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/RINGIND/article/view/5793

Amores-Monge, V., Goyanes, S., Ribba, L., Lopretti, M., Sandoval-Barrantes, M., Camacho, M., Corrales-Ureña, Y., & Vega-Baudrit, J. R. (2022). Pineapple agro-industrial biomass to produce biomedical applications in a circular economy context in Costa Rica. *Polymers, 14*(22), 4864. https://doi.org/10.3390/polym14224864

Arango Pérez, S.E. (2022) *Evaluación de nanocelulosa fibrilar (ncf) obtenida a partir de bolaina blanca (Guazuma Crinita) proveniente de una plantación de Ucayali, Perú* [Tesis de titulación, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Universidad Nacional Agraria La Molina: https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5528

Banu, R., Sugitha, S., Kavitha, S. & Ravi, Kannah, Y., Merrylin, J. & Kumar, G. (2021). Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Enhanced Bioenergy Recovery: Effect of Lignocelluloses Recalcitrance and Enhancement Strategies. *Frontiers in Energy Research*. *9*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.646057.

Coelho, C. C. S., Michelin, M., Miguel, A. C., Catarina, G., Renata, V. T., Otniel, F. S., et al. (2018). Cellulose nanocrystals from grape pomace: production, properties and cytotoxicity assessment. *Carbohydr. Polym. 192*, 327–336. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.03.023

Decheco Egúsquiza, A.C. (2018) *Obtención de jarabes Glucosados a partir de cáscaras de Ananás comosus (PIÑA) mediante hidrólisis enzimática de celulásas* [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Callao. https://hdl.handle.net/20.500.12952/4032

Deng, Y., Xi, J., Meng, L., Lou, Y., Seidi, F., Wu, W., & Xiao, H. (2022). Stimuli-responsive nanocellulose hydrogels: An overview. *European Polymer Journal, 180,* 111591. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111591

Du, H., Liu, W., Zhang, M., Si, C., Zhang, X., & Li, B. (2019). Cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils based hydrogels for biomedical applications. *Carbohydrate polymers*, *209*, 130-144 . 10.1016/j.carbpol.2019.01.020.

El Achaby, M., Kassab, Z., Barakat, A., & Aboulkas, A. (2018). Alfa fibers as viable sustainable source for cellulose nanocrystals extraction: application for improving the tensile properties of biopolymer nanocomposite films. *Ind. Crops Prod. 112*, 499–510. doi: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.049

Espinosa Negrín, A. M. & López González, L. M. & Casdelo Gutiérrez, N. (2022). Pretratamientos aplicados a biomasas lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Rev Cub Quim [online],* vol.34, n.1, pp.87-110. ISSN 2224-5421. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443570155006

Espinosa, E. (2019). *Lignonanofibras de celulosa (LNFC) a partir de residuos agro-industriales no madereros. Obtención, caracterización y aplicaciones*. [Trabajo de Doctorado, Universidad de Córdova]. Obtenido de http://hdl.handle.net/10396/18994

Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Velásquez Cock, J., Osorio, M., Montoya, Úrsula, Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (2017). Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana De Materiales*, (11), 1–4. https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/328779

García-Alcocer, S., Salgado-García, S., Córdova-Sánchez, S., Rincón-Ramírez, J., Bolio-López, G., Castañeda-Ceja, R., Saucedo-Corona, A., Falconi-Calderón, R., & Valerio-Cárdenas,

C. (2019). Blanqueo de la fibra de celulosa de paja de caña de azúcar (Saccharum spp.) con peróxido de hidrógeno. *Agroproductividad, 12*(9), 83–88. https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1434

García, D., Zegarra, R. (2020*) Obtención de nanocelulosa de la cáscara de sandía (Citrullus lanatus) y sus imágenes de microscopía electrónico de barrido (S.E.M.)*. [Tesis de bachiller, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional de la Universidad Peruana Unión. http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3418

Gavin Vimos, J. L. (2022). Análisis comparativo de la exportación de la piña con subpartida arancelaria 0804.30.00.00 entre los países miembros del Acuerdo Comercial Multipartes hacia la Unión Europea durante el periodo 2010 – 2020. Carrera de Comercio Exterior y Negociación Internacional. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Matriz Sangolquí. http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/33981

Gobierno Regional de Lambayeque. (10 de enero de 2024). GORE Lambayeque asegura apoyo técnico y maquinaria para erradicar residuos en Chiclayo durante todo el 2024. https://www.gob.pe/institucion/regionlambayeque/noticias/892016-gore-lambayeque-asegura-apoyo-tecnico-y-maquinaria-para-erradicar-residuos-en-chiclayo-durante-todo-el-2024

Guía de alimentos. (s.f.) Piña. *CuerpoMente*. https://www.cuerpomente.com/guia-alimentos/pina

Guo, X., Liu, L., Wu, J., Fan, J., & Wu, Y. (2018). Qualitatively and quantitatively characterizing water adsorption of a cellulose nanofiber film using micro-FTIR spectroscopy. *RSC Advances, 8*(8), 4214–4220. https://doi.org/10.1039/C7RA09894D

Gutiérrez Villanueva, A. R., Guirola Céspedes, C., de Armas Martínez, A. C., Albernas Carvajal, Y., & Villanueva Ramos, G. (2020). VALORIZACIÓN DE LA LIGNINA EN EL CONCEPTO DE BIORREFINERÍA (I). *Revista Centro Azúcar, 47*(3), 95–105. Recuperado a partir de http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/593

Hernández Leal, R., Brachetti Sibaja, S. B., Torres-Huerta, A. M., & Domínguez Crespo, M. A. (2023). Aislamiento y caracterización de nanocelulosa a partir de distintos residuos agroindustriales. *Emerging Trends in Education, 7*(2), 111–124. Recuperado de: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9493837

Herrera Terán, M.E. (2018) *Obtención de nanocelulosa a partir de celulosa de puntas de abacá* [Tesis de titulación, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional. http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19544

Hospodarova, V., Singovszka, E. and Stevulova, N. (2018) Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry, 9*, 303-310. doi: 10.4236/ajac.2018.96023.

Javier Astete, R. E. (2021). *Validación de la metodología para la determinación de Lignina celulosa y Hemicelulosa por espectroscopía infrarroja en árboles* [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria la Molina. https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5176

Labrador Sánchez, H. & Osto, S. (2021). CARACTERIZACIÓN DE LA CELULOSA PROVENIENTE DEL LODO PAPELERO Y SU ESTERIFICACIÓN. *Revista de la Facultad de Ciencias, 10*(2), 67–81. https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v10n2.94003

Lizundia, E., Costa, C., Alves, R. & Lanceros-Méndez, S. (2020). Cellulose and its derivatives for lithium ion battery separators: A review on the processing methods and properties. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* [en línea], 1(100001), pp. 1-20. ISSN 26668939. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100001.

Ioelovich, M. (2012) Study of Cellulose Interaction with Concentrated Solutions of Sulfuric Acid. *International Scholarly Research Notices*, 428974, 7 pages. doi: https://doi.org/10.5402/2012/428974

Lozada Parra, A.D. (2020) *Obtención y caracterización de nanocelulosa a partir de la cáscara de café para la elaboración de un biosorbente utilizado en la remoción de cadmio como metal pesado* [Tesis de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/23131

Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera Y Bosques, 27*(2), e2722137. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137

Megías M., Molist P., Pombal M.A. (s.f.). *Tejidos vegetales. Conductores*. Atlas de histología vegetal y animal. https://mmegias.webs.uvigo.es/1-vegetal/guiada_v_conductores.php. Consultado: 23 de May. de 25.

Mesén, J. & Mora, K. & Jirón García, E. & Bernal, C. (2023). *Producción de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana.* UNED Research Journal. 15. e4593. 10.22458/urj.v15i2.4593.

Miguel Hijar, E. H. (2008) *Obtención de fibra dietética a partir de piña (Ananas Comosus) del cultivar Cayena Lisa* [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Centro del Perú-Huancayo]. Repositorio UNCP. http://hdl.handle.net/20.500.12894/2632

Muñoz Bartolomé, B. (2018). *Síntesis y caracterización de nanocelulosas de orígenes diversos.* [Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona] http://hdl.handle.net/2117/120299

Naduparambath, S., Jinitha, T. V., Shaniba, V., Sreejith, M. P., Balan, A. K., & Purushothaman, E. (2018). Isolation and characterisation of cellulose nanocrystals from sago seed shells. *Carbohydr. Polym. 180*, 13–20. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.09.088

Oh, S. Y., Yoo, D. I., Shin, Y., & Seo, G. (2005). FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research, 340*(3), 417–428. https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.11.027

Ortega Cahui, M.B. (2019) *Elaboración de bioplástico a partir de paja y residuos de granos de arroz* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. Recuperado de tesis: https://hdl.handle.net/20.500.12867/2810

Ortega Ibarra, E., Hernández Ramírez, G., & Ortega Ibarra, I. H. (2021). Composición nutricional y compuestos fitoquímicos de la piña (Ananas comosus) y su potencial

emergente para el desarrollo de alimentos funcionales. *Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP, 7*(14), 24-28. https://doi.org/10.29057/icap.v7i14.7232

Paz Cedeño, M. F. (2015). *Determinación del contenido de fibra dietética en dos variedades de piña (Golden Sweet y Ananás comosus) considerando el estado fisiológico y las condiciones agroecológicas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio UTEQ. https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/302

Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A. & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion, 1*(1), pp. 32-43. ISSN 25889133. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004

Pérez López, M., Flores Cruz, M., Martínez Vázquez, M., Soto Hernández, M., García Contreras, R., Padilla Chacón, D. & Castillo Juárez, I. (2020). Anti-virulence activities of some Tillandsia species (Bromeliaceae). *Botanical Sciences, 98*(1), 117-127. Epub 20 de junio de 2020. https://doi.org/10.17129/botsci.2380

Presenda, A., Bolio, G., Azamar, V., Ramírez, J., Sarracino, O., Hernández, M., De La Cruz, P. (2020) Obtención de celulosa a partir de residuos de piña (Ananas comosus L. Merril). *Agro Productividad*, 13(2),77-82. http://dx.doi.org/10.32854/agrop.vi.1608

Quispe Pino, J. E., & Velásquez Cossi, P. F. (2022). Obtención de celulosa a partir residuos de tallos de Chenopodium Quinoa. *INGENIERÍA INVESTIGA*, *4.* https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.707

Rahman, N., Tajuddin, H. A., Karim, Z., Dungani, R., & Abdullah, M. (2017). Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from tea leaf waste fibers. *Polymers*, 9(11), 588. https://doi.org/10.3390/polym9110588

Ramírez Hernández, Z. (2020) *Obtención de nanocelulosa a partir de residuos de la Industria Citrícola del Municipio de Álamo Temapache Veracruz* [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. Recuperado de tesis: http://cdigital.uv.mx/handle/1944/50572

Rodríguez Alfonso, D., Isidrón Pérez, M., & Menéndez Álvarez, E. (2020). Los recursos fitogenéticos de piña (Ananas comosus var. comosus (L.) Merr.) en Cuba. *Revista De Investigaciones De La Universidad Le Cordon Bleu*, *6*(2), 27-40. https://doi.org/10.36955/RIULCB.2019v6n2.003

Rojas-González, A. F., Flórez-Montes, C., & López-Rodríguez, D. F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química, 31*(1), 31-52. Recuperado en 22 de mayo de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212019000100031&lng=es&tlng=es.

Rojas-León, A., Otazo-Sánchez, E., Bolarín-Miró, A., Prieto-García, F., & Román-Gutiérrez, A. (2014). *Residuos agrícolas: Caracterización y estrategias sustentables para su aprovechamiento*. Revista Iberoamericana de Ciencias, 1(2), 253–262. Recuperado de https://www.reibci.org/publicados/2014/julio/2200107.pdf

Rosas Vega, F. E. (2023). *Producción de Xilooligosacaridos (XOS) por hidrólisis de la fracción de Hemicelulosa obtenida a partir de residuos de quinua*. [Tesis de titulación,

Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santa María: https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12454

Rubin, E. (2008) Genomics of cellulosic biofuels. *Nature* 454, 841–845. https://doi.org/10.1038/nature07190

Sanaguano Peralta, S.E (2021) *Obtención de nanocelulosa a partir de la hoja de mazorca de maíz (Zea Mays L.) mediante el proceso de hidrólisis ácida* [Tesis de titulación, Escuela superior Politécnica de Chimborazo]. Recuperado de tesis: http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/14991

Sánchez-Leonel, M., Olivares-Hernández, A. E., Arzate-Vázquez, I., Méndez-Méndez, J. V., & Nicolás-Bermúdez, J. (2023). ¿Por qué las nueces son tan duras? *Desde el Herbario CICY, 15,* 184–189. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2023/2023-21-09_LSanchez-Por-que-as-nueces-son-tan-duras.pdf

Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., & Hussin, M. H. (2020). *Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. Frontiers in chemistry*, 8, 392. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392

Velasco-Rosas, L.S., Estrada-Flores, M. & Reza-San-Germán, C.M. (2020). Obtención de celulosa a base de plantas que crecen alrededor de las aguas de canal. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 6(6), 395-399. http://hdl.handle.net/11191/7741

Vera, E. (Mayo 5, 2023) Deforestación en Perú: “Se pueden ver los botes repletos con nuestra madera, pero nadie hace nada”. *MONGABAY Periodismo Ambiental Independiente en*

Latinoamérica. https://es.mongabay.com/2023/05/deforestacion-en-region-amazonas-peru-bosques/

Vidales C. H. (2019). *Métodos de extracción de nanocelulosa a partir de residuos de Agave spp.* [Tesis en opción al título de técnico superior universitario en química área biotecnología, Universidad Tecnológica del Valle de Toluca]. Unidad Académica de Capulhuac. 48 pp. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Villalva Taipe, Y. M. (2021). *Descripción organoléptica y anatómica de la madera de cinco especies forestales mediante tinción, procedentes de la hacienda Atenas, parroquia Alluriquín, cantón Santo Domingo* [Tesis de titulación, Escuela superior Politécnica de Chimborazo]. Recuperado de tesis: https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15820

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *62*, 33–86. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004

Yu, X., Jiang, Y., Wu, Q., Wei, Z., Lin, X., & Chen, Y. (2021). Preparation and characterization of cellulose nanocrystal extraction from Pennisetum hydridum fertilized by municipal sewage sludge via sulfuric acid hydrolysis. *Frontiers in Energy Research, 9,* 774783. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.774783

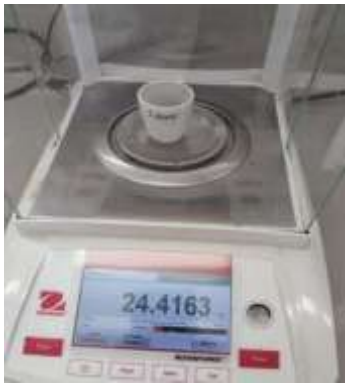
Zambrano Zambrano, G. A., García Macías, V. L., Cedeño Palacios, C. A. & Alcívar Cedeño, U. E. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (Oryza sativa) para la obtención de fibras de celulosa. *Polo del conocimiento, 6*(4), 415-437. ISSN-e 2550-682X. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7927005

IX. ANEXOS

ANEXO N° 1: Imágenes recolectadas durante la experimentación de la investigación

1.1 Fotografías determinando el porcentaje de humedad del bagazo de piña usando la termobalanza.

1.2 Fotografías determinando el contenido de ceniza del bagazo de piña en base seca



1.3 Fotografías determinando el contenido de lignina del bagazo de piña en base seca

0.9919

1.4 Fotografías determinando la solubilidad en agua caliente del bagazo de piña seco

1.5 Fotografías realizando el proceso de extracción de la celulosa del bagazo de piña

1.5.1. Acondicionamiento y pretratamiento de la materia prima

1.5.2 Extracción de celulosa

1.6 Fotografías realizando el proceso de obtención de nanocelulosa

1.7 Fotografías de la determinación del contenido de alfa celulosa de la celulosa extraída

1.8 Fotografías determinando la apariencia de las fibras mediante microscopio óptico

1.9 Fotografías determinando la transmitancia mediante espectrofotómetro UV-Vis

ANEXO N° 2: Datos obtenidos durante la experimentación a través de sus respectivos cálculos para caracterizar al bagazo de la piña

Ceniza

	Muestra seca (gr)	**Crisol tarado (gr)**	**Crisol + cenizas (gr)**	**Cálculo**	**Porcentaje (%)**
Réplica 1	3.0884	24.3858	24.4163	$\frac{(24.4163 - 24.3858)}{3.0884}$x100	0.988
Réplica 2	3.1520	38.2742	38.3038	$\frac{(38.3038 - 38.2742)}{3.1520}$x100	0.939
				PROMEDIO	**0.9635**

Lignina

	Muestra seca (gr)	**Papel filtro (gr)**	**Papel filtro + lignina (gr)**	**Cálculo**	**Porcentaje (%)**
Réplica 1	1.0523	0.8135	0.9919	$\frac{(0.9919 - 0.8135)}{1.0523}$x100	16.953
Réplica 2	1.0197	0.8040	0.9808	$\frac{(0.9808 - 0.8040)}{1.0197}$x100	17.338
				PROMEDIO	**17.145**

Solubilidad en agua caliente

	Muestra seca (gr)	**Muestra seca después del proceso (gr)**	**Cálculo**	**Porcentaje**
Réplica 1	10.0534	7.4681	$\frac{(10.0534 - 8.2721)}{10.0534}$x100	25.716
Réplica 2	10.0166	7.2928	$\frac{(10.0166 - 7.8850)}{10.0166}$x100	27.193
			PROMEDIO	26.4545

ANEXO N° 3: Informe de la espectroscopía infrarroja realizado en un laboratorio privado.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.

INFORME DE ENSAYO IE-2025-0588

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA (FTIR-ATR) (S-0775)

- Normas de Referencia: ASTM E1252 "Práctica estándar para técnicas generales para obtener espectros infrarrojos para análisis cualitativo".
- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 380 cm-1 a 4000 cm-1

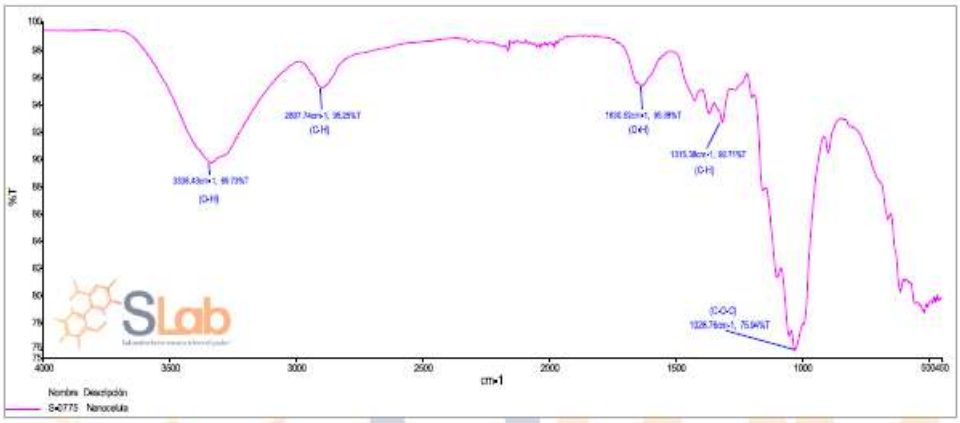


Figura N°1: ESPECTROS FTIR-ATR DE LA MUESTRA

Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES

Tipo de Vibración	Grupo funcional	Rango Teórico (cm-1)	Resultado experimental (cm-1)
Banda de vibración de tensión	" O-H "	3400-3300	3338
Banda de vibración de tensión	" C-H "	2950-2800	2897
Banda de vibración de flexión	" O-H "	1740-1570	1630
Banda de vibración de flexión	" C-H "	1390-1310	1315
Banda de vibración de tensión	" C-O-C "	1300-1000	1028

IMAGEN N°1: Equipo Espectrofotómetro FTIR ATR

IMAGEN N°2: Muestras de Nanocelulosa

IMAGEN N°3: Vista microscópica de muestra seca

ANEXO N° 4: Tabla de densidades del ácido sulfúrico a diferentes temperaturas y concentraciones

TABLE 2-101 Sulfuric Acid (H_2SO_4) Kg/Liter

%	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
1	1.0074	1.0068	1.0060	1.0051	1.0038	1.0022	0.9986	0.9944	0.9895	0.9779	0.9645
2	1.0147	1.0138	1.0129	1.0118	1.0104	1.0087	1.0050	1.0006	.9956	.9839	.9705
3	1.0219	1.0206	1.0197	1.0184	1.0169	1.0152	1.0113	1.0067	1.0017	.9900	.9766
4	1.0291	1.0275	1.0264	1.0250	1.0234	1.0216	1.0176	1.0129	1.0078	.9961	.9827
5	1.0364	1.0344	1.0332	1.0317	1.0300	1.0281	1.0240	1.0192	1.0140	1.0022	.9888
6	1.0437	1.0414	1.0400	1.0385	1.0367	1.0347	1.0305	1.0256	1.0203	1.0084	.9950
7	1.0511	1.0485	1.0469	1.0453	1.0434	1.0414	1.0371	1.0321	1.0266	1.0146	1.0013
8	1.0585	1.0556	1.0539	1.0522	1.0502	1.0481	1.0437	1.0386	1.0330	1.0209	1.0076
9	1.0660	1.0628	1.0610	1.0591	1.0571	1.0549	1.0503	1.0451	1.0395	1.0273	1.0140
10	1.0735	1.0700	1.0681	1.0661	1.0640	1.0617	1.0570	1.0517	1.0460	1.0338	1.0204
11	1.0810	1.0773	1.0753	1.0731	1.0710	1.0686	1.0637	1.0584	1.0526	1.0403	1.0269
12	1.0886	1.0846	1.0825	1.0802	1.0780	1.0756	1.0705	1.0651	1.0593	1.0469	1.0335
13	1.0962	1.0920	1.0898	1.0874	1.0851	1.0826	1.0774	1.0719	1.0661	1.0536	1.0402
14	1.1039	1.0994	1.0971	1.0947	1.0922	1.0897	1.0844	1.0788	1.0729	1.0603	1.0469
15	1.1116	1.1069	1.1045	1.1020	1.0994	1.0968	1.0914	1.0857	1.0798	1.0671	1.0537
16	1.1194	1.1145	1.1120	1.1094	1.1067	1.1040	1.0985	1.0927	1.0868	1.0740	1.0605
17	1.1272	1.1221	1.1195	1.1168	1.1141	1.1113	1.1057	1.0998	1.0938	1.0809	1.0674
18	1.1351	1.1298	1.1271	1.1243	1.1215	1.1187	1.1129	1.1070	1.1009	1.0879	1.0744
19	1.1430	1.1375	1.1347	1.1318	1.1290	1.1261	1.1202	1.1142	1.1081	1.0950	1.0814
20	1.1510	1.1453	1.1424	1.1394	1.1365	1.1335	1.1275	1.1215	1.1153	1.1021	1.0885
21	1.1590	1.1531	1.1501	1.1471	1.1441	1.1410	1.1349	1.1288	1.1226	1.1093	1.0957
22	1.1670	1.1609	1.1579	1.1548	1.1517	1.1486	1.1424	1.1362	1.1299	1.1166	1.1029
23	1.1751	1.1688	1.1657	1.1626	1.1594	1.1563	1.1500	1.1437	1.1373	1.1239	1.1102
24	1.1832	1.1768	1.1736	1.1704	1.1672	1.1640	1.1576	1.1512	1.1448	1.1313	1.1176
25	1.1914	1.1848	1.1816	1.1783	1.1750	1.1718	1.1653	1.1588	1.1523	1.1388	1.1250
26	1.1996	1.1929	1.1896	1.1862	1.1829	1.1796	1.1730	1.1665	1.1599	1.1463	1.1325
27	1.2078	1.2010	1.1976	1.1942	1.1909	1.1875	1.1808	1.1742	1.1676	1.1539	1.1400
28	1.2160	1.2091	1.2057	1.2023	1.1989	1.1955	1.1887	1.1820	1.1753	1.1616	1.1476
29	1.2243	1.2173	1.2138	1.2104	1.2069	1.2035	1.1966	1.1898	1.1831	1.1693	1.1553
30	1.2326	1.2255	1.2220	1.2185	1.2150	1.2115	1.2046	1.1977	1.1909	1.1771	1.1630
31	1.2409	1.2338	1.2302	1.2267	1.2232	1.2196	1.2126	1.2057	1.1988	1.1849	1.1708
32	1.2493	1.2421	1.2385	1.2349	1.2314	1.2278	1.2207	1.2137	1.2068	1.1928	1.1787
33	1.2577	1.2504	1.2468	1.2432	1.2396	1.2360	1.2289	1.2218	1.2148	1.2008	1.1866
34	1.2661	1.2588	1.2552	1.2515	1.2479	1.2443	1.2371	1.2300	1.2229	1.2088	1.1946
35	1.2746	1.2672	1.2636	1.2599	1.2563	1.2526	1.2454	1.2383	1.2311	1.2169	1.2027
36	1.2831	1.2757	1.2720	1.2684	1.2647	1.2610	1.2538	1.2466	1.2394	1.2251	1.2109
37	1.2917	1.2843	1.2805	1.2769	1.2732	1.2695	1.2622	1.2550	1.2477	1.2334	1.2192
38	1.3004	1.2929	1.2891	1.2855	1.2818	1.2780	1.2707	1.2635	1.2561	1.2418	1.2276
39	1.3091	1.3016	1.2978	1.2941	1.2904	1.2866	1.2793	1.2720	1.2646	1.2503	1.2361
40	1.3179	1.3103	1.3065	1.3028	1.2991	1.2953	1.2880	1.2806	1.2732	1.2589	1.2446
41	1.3268	1.3191	1.3153	1.3116	1.3079	1.3041	1.2967	1.2893	1.2819	1.2675	1.2532
42	1.3357	1.3280	1.3242	1.3205	1.3167	1.3129	1.3055	1.2981	1.2907	1.2762	1.2619
43	1.3447	1.3370	1.3332	1.3294	1.3256	1.3218	1.3144	1.3070	1.2996	1.2850	1.2707
44	1.3538	1.3461	1.3423	1.3384	1.3346	1.3308	1.3234	1.3160	1.3086	1.2939	1.2796
45	1.3630	1.3553	1.3515	1.3476	1.3437	1.3399	1.3325	1.3251	1.3177	1.3029	1.2886
46	1.3724	1.3646	1.3608	1.3569	1.3530	1.3492	1.3417	1.3343	1.3269	1.3120	1.2976
47	1.3819	1.3740	1.3702	1.3663	1.3624	1.3586	1.3510	1.3435	1.3362	1.3212	1.3067
48	1.3915	1.3835	1.3797	1.3758	1.3719	1.3680	1.3604	1.3528	1.3455	1.3305	1.3159
49	1.4012	1.3931	1.3893	1.3854	1.3814	1.3775	1.3699	1.3623	1.3549	1.3399	1.3253
50	1.4110	1.4029	1.3990	1.3951	1.3911	1.3872	1.3795	1.3719	1.3644	1.3494	1.3348
51	1.4209	1.4128	1.4088	1.4049	1.4009	1.3970	1.3893	1.3816	1.3740	1.3590	1.3444
52	1.4310	1.4228	1.4188	1.4148	1.4109	1.4069	1.3991	1.3914	1.3837	1.3687	1.3540
53	1.4412	1.4329	1.4289	1.4248	1.4209	1.4169	1.4091	1.4013	1.3936	1.3785	1.3637
54	1.4515	1.4431	1.4391	1.4350	1.4310	1.4270	1.4191	1.4113	1.4036	1.3884	1.3735
55	1.4619	1.4535	1.4494	1.4453	1.4412	1.4372	1.4293	1.4214	1.4137	1.3984	1.3834
56	1.4724	1.4640	1.4598	1.4557	1.4516	1.4475	1.4396	1.4317	1.4239	1.4085	1.3934
57	1.4830	1.4746	1.4703	1.4662	1.4621	1.4580	1.4500	1.4420	1.4342	1.4187	1.4035
58	1.4937	1.4852	1.4809	1.4768	1.4726	1.4685	1.4604	1.4524	1.4446	1.4290	1.4137
59	1.5045	1.4959	1.4916	1.4875	1.4832	1.4791	1.4709	1.4629	1.4551	1.4393	1.4240
60	1.5154	1.5067	1.5024	1.4983	1.4940	1.4898	1.4816	1.4735	1.4656	1.4497	1.4344
61	1.5264	1.5177	1.5133	1.5091	1.5048	1.5006	1.4923	1.4842	1.4762	1.4602	1.4449
62	1.5375	1.5287	1.5243	1.5200	1.5157	1.5115	1.5031	1.4950	1.4869	1.4708	1.4554
63	1.5487	1.5398	1.5354	1.5310	1.5267	1.5225	1.5140	1.5058	1.4977	1.4815	1.4660
64	1.5600	1.5510	1.5465	1.5421	1.5378	1.5335	1.5250	1.5167	1.5086	1.4923	1.4766

TABLE 2-101 Sulfuric Acid (H_2SO_4) *(Concluded)*

%	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
65	1.5714	1.5623	1.5578	1.5533	1.5490	1.5446	1.5361	1.5277	1.5195	1.5031	1.4873
66	1.5828	1.5736	1.5691	1.5646	1.5602	1.5558	1.5472	1.5388	1.5305	1.5140	1.4981
67	1.5943	1.5850	1.5805	1.5760	1.5715	1.5671	1.5584	1.5499	1.5416	1.5249	1.5089
68	1.6059	1.5965	1.5920	1.5874	1.5829	1.5785	1.5697	1.5611	1.5528	1.5359	1.5198
69	1.6176	1.6081	1.6035	1.5989	1.5944	1.5899	1.5811	1.5724	1.5640	1.5470	1.5307
70	1.6293	1.6198	1.6151	1.6105	1.6059	1.6014	1.5925	1.5838	1.5753	1.5582	1.5417
71	1.6411	1.6315	1.6268	1.6221	1.6175	1.6130	1.6040	1.5952	1.5867	1.5694	1.5527
72	1.6529	1.6433	1.6385	1.6338	1.6292	1.6246	1.6155	1.6067	1.5981	1.5806	1.5637
73	1.6648	1.6551	1.6503	1.6456	1.6409	1.6363	1.6271	1.6182	1.6095	1.5919	1.5747
74	1.6768	1.6670	1.6622	1.6574	1.6526	1.6480	1.6387	1.6297	1.6209	1.6031	1.5857
75	1.6888	1.6789	1.6740	1.6692	1.6644	1.6597	1.6503	1.6412	1.6322	1.6142	1.5966
76	1.7008	1.6908	1.6858	1.6810	1.6761	1.6713	1.6619	1.6526	1.6435	1.6252	1.6074
77	1.7128	1.7026	1.6976	1.6927	1.6878	1.6829	1.6734	1.6640	1.6547	1.6361	1.6181
78	1.7247	1.7144	1.7093	1.7043	1.6994	1.6944	1.6847	1.6751	1.6657	1.6469	1.6286
79	1.7365	1.7261	1.7209	1.7158	1.7108	1.7058	1.6959	1.6862	1.6766	1.6575	1.6390
80	1.7482	1.7376	1.7323	1.7272	1.7221	1.7170	1.7069	1.6971	1.6873	1.6680	1.6493
81	1.7597	1.7489	1.7435	1.7383	1.7331	1.7279	1.7177	1.7077	1.6978	1.6782	1.6594
82	1.7709	1.7599	1.7544	1.7491	1.7437	1.7385	1.7281	1.7180	1.7080	1.6882	1.6692
83	1.7815	1.7704	1.7649	1.7594	1.7540	1.7487	1.7382	1.7279	1.7179	1.6979	1.6787
84	1.7916	1.7804	1.7748	1.7693	1.7639	1.7585	1.7479	1.7375	1.7274	1.7072	1.6878
85	1.8009	1.7897	1.7841	1.7786	1.7732	1.7678	1.7571	1.7466	1.7364	1.7161	1.6966
86	1.8095	1.7983	1.7927	1.7872	1.7818	1.7763	1.7657	1.7552	1.7449	1.7245	1.7050
87	1.8173	1.8061	1.8006	1.7951	1.7897	1.7842	1.7736	1.7632	1.7529	1.7324	1.7129
88	1.8243	1.8132	1.8077	1.8022	1.7968	1.7914	1.7809	1.7705	1.7602	1.7397	1.7202
89	1.8306	1.8195	1.8141	1.8087	1.8033	1.7979	1.7874	1.7770	1.7669	1.7464	1.7269
90	1.8361	1.8252	1.8198	1.8144	1.8091	1.8038	1.7933	1.7829	1.7729	1.7525	1.7331
91	1.8410	1.8302	1.8248	1.8195	1.8142	1.8090	1.7986	1.7883	1.7783	1.7581	1.7388
92	1.8453	1.8346	1.8293	1.8240	1.8188	1.8136	1.8033	1.7932	1.7832	1.7633	1.7439
93	1.8490	1.8384	1.8331	1.8279	1.8227	1.8176	1.8074	1.7974	1.7876	1.7681	1.7485
94	1.8520	1.8415	1.8363	1.8312	1.8260	1.8210	1.8109	1.8011	1.7914		
95	1.8544	1.8439	1.8388	1.8337	1.8286	1.8236	1.8137	1.8040	1.7944		
96	1.8560	1.8457	1.8406	1.8355	1.8305	1.8255	1.8157	1.8060	1.7965		
97	1.8569	1.8466	1.8414	1.8364	1.8314	1.8264	1.8166	1.8071	1.7977		
98	1.8567	1.8463	1.8411	1.8361	1.8310	1.8261	1.8163	1.8068	1.7976		
99	1.8551	1.8445	1.8393	1.8342	1.8292	1.8242	1.8145	1.8050	1.7958		
100	1.8517	1.8409	1.8357	1.8305	1.8255	1.8205	1.8107	1.8013	1.7922		

%	$d_4^{25.00}$	%	$d_4^{10.00}$	$d_4^{20.00}$
0.005	1.000 0140	0.05	0.999 810	0.999 028
.01	1.000 0576	.1	1.000 185	.999 400
.02	1.000 1434	.2	1.000 912	1.000 119
.03	1.000 2276	.3	1.001 623	1.000 820
.04	1.000 3104	.4	1.002 326	1.001 512
.05	1.000 3920	.5	1.003 023	1.002 197
.06	1.000 4726	.6	1.003 716	1.002 877
.07	1.000 5523	.8	1.005 090	1.004 227
.08	1.000 6313	1.0	1.006 452	1.005 570
.09	1.000 7098	1.2	1.007 807	1.006 909
.10	1.000 7880	1.4	1.009 159	1.008 247
.15	1.001 1732	1.6	1.010 510	1.009 583
.20	1.001 5514	1.8	1.011 860	1.010 918
.25	1.001 9254	2.0	1.013 209	1.012 252
.30	1.002 2961	2.2	1.014 557	1.013 586
.35	1.002 6639	2.4	1.015 904	1.014 919
.40	1.003 0292			
.45	1.003 3923			
.50	1.003 7534			

OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tipo de variable	Variable	Sub-variable	Concepto	Equipos	Indicador	Unidad de medida
VARIABLE DEPENDIENTE	Obtención de nanocelulosa	Eficiencia	Obtención de la eficiencia resultado de los tratamientos aplicados	Elección del mejor tratamiento (Afinidad)	Observación	Cantidad de pureza
		Longitud	Distancia de la altura de una forma cilíndrica de un cristal formado de nanocelulosa	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	Observación	Forma y tamaño de la nanocelulosa en nm
		Diámetro	Distancia de la base de una forma cilíndrica de un cristal formado de nanocelulosa	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	Observación	Forma y tamaño de la nanocelulosa en nm

VARIABLE INDEPENDIENTE	Bagazo de piña	Porcentaje de humedad	Es el agua contenida presente en el bagazo de piña.	Balanza analítica Estufa de secado Desecador	Norma TAPPI T 12 os-75	85.2%
		Porcentaje de lignina	Es la cantidad de lignina presente en el bagazo de piña, en base seca	Aplicación de la fórmula según la norma e instrumentos.	Norma TAPPI T 222 os-74	2.38%
		Porcentaje de alfa-celulosa	Es la cantidad de alfa-celulosa (celulosa con alto peso molecular) rescatado del tratamiento alcalino.	Aplicación de la fórmula según la norma e instrumentos.	Norma TAPPI T 203 cm-99	70-85%
	Temperatura	Temperatura aplicada para la obtención de celulosa	Es la temperatura máxima durante la cocción del bagazo de piña y proceso	Termómetro	N.A.	25-65-100°C

		de hidrólisis básica con solución de NaOH.			
	Temperatura aplicada para la obtención de nanocelulosa	Es la temperatura máxima durante la cocción de la celulosa con H_2SO_4 a distintas concentraciones.	Termómetro	N.A.	25-65-100°C
Tiempo de reacción	Tiempo de reacción aplicada para la obtención de celulosa	Tiempo que procede para la separación de la celulosa, durante el proceso de hidrólisis alcalina	Cronómetro	Hidrólisis alcalina con Hidróxido de sodio	24 horas
	Tiempo de reacción aplicada para la obtención de nanocelulosa	Tiempo de conversión de la celulosa en nanocelulosa, durante el proceso de hidrólisis ácida	Cronómetro	Hidrólisis ácida con H2SO4	45 Min

	Concentración de Reactivos	-	Es la magnitud química que evidencia la proporción entre el soluto y el disolvente	Fórmulas según el concepto y uso de proporciones	Soluciones preparadas	% p/p % p/v % v/v
	Tiempo de sonicación	-	Es la magnitud física de aplicación de la energía del sonido(ultrasonido) que muestra el tiempo de interacción entre las muestras	Cronómetro	Lectura del instrumento de medición	35 min