

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

**OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA Y
CARACTERIZACIÓN A PARTIR DE CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia
ficus-indica*)**

PRESENTADO POR:

Br. CARLOS ALBERTO VASQUEZ SALAS

Br. RUTH MILAGROS CCACYAMARCA MACHACCA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

ASESORA:

Msc. ING. ANTONIETA MOJO QUISANI

FINANCIADO POR:

PROGRAMA “YACHAYNINCHIS WIÑARINANPAQ” –
UNSAAC

CUSCO - PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MSC. ING. ANTONIETA MOJO GUISANI
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:

OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA Y CARACTERIZACIÓN A
PARTIR DE CÁSCARA DE TUNA (Opuntia ficus-indica).
.....

Presentado por: CARLOS ALBERTO VASQUEZ SALAS DNI N° 74150117

presentado por: RUTH MILAFROS CCACAYAMARCA MACHACCA DNI N°: 75322853

Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO AGRICOLA INDUSTRIAL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 09 de SEPTIEMBRE de 2026


.....
Firma

Post firma Antonieta Mojo Guisani

Nro. de DNI 24716895

ORCID del Asesor 0000-0002-4370-4409

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** trn:oid::27259:622422551

Carlos y Milagros

OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA Y CARACTERIZACIÓN A PARTIR DE CÁSCARA DE TUNA (Opunti...



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::27259:622422551

83 páginas

Fecha de entrega

9 sep 2026, 8:37 p.m. GMT-5

20.521 palabras

Fecha de descarga

9 sep 2026, 8:40 p.m. GMT-5

124.025 caracteres

Nombre del archivo

Tesis de NCC de Tuna.pdf

Tamaño del archivo

2.1 MB



Hsc. Ing. Antonieta Hojo Quisani

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Msc. Ing. Antonieta Hojo Quisani

PRESENTACIÓN

Sr. Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

En cumplimiento con las disposiciones del reglamento vigente de grados y títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco ponemos a su disposición la presentación de tesis intitulado: **“OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA Y CARACTERIZACIÓN A PARTIR DE CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-indica*)”**.

El presente trabajo de investigación contribuye al desarrollo científico y tecnológico, ofreciendo un método alternativo para el aprovechamiento de residuos agroindustriales como la cáscara de tuna, de este modo, se busca revalorizar un subproducto que normalmente se desecha, generando insumos útiles para futuras investigaciones y aplicaciones en materiales avanzados.

Carlos Alberto Vasquez Salas

Ruth Milagros Ccacyamarca Machacca

ÍNDICE GENERAL

	pág.
PRESENTACIÓN.....	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE ANEXOS	6
ABREVIATURAS.....	7
AGRADECIMIENTO	8
DEDICATORIA	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	15
1.2. Formulación del Problema	15
1.2.1 Problema General	15
1.2.2 Problemas Específicos	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4. Justificación de Estudio.....	16
II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	18
2.1. Antecedentes de la investigación.....	18
2.2. Bases Teóricas	21
2.2.1 Cáscara de Tuna	21
2.2.1.1. Procesamiento de la Cáscara de Tuna.....	21
2.2.2 Biomasa Lignocelulósica.....	21
2.2.2.1. Lignina	22
2.2.2.2. Celulosa.....	23
2.2.2.3. Hemicelulosa.....	24
2.2.3 Nanocristales de Celulosa.....	25

2.2.4 Tratamientos para la Obtención de los Nanocristales de Celulosa.....	26
2.2.4.1. Tratamiento Alcalino	26
2.2.4.2. Tratamiento de Blanqueo.....	26
2.2.4.3. Hidrólisis Ácida	27
2.2.5 Caracterización de los Nanocristales de Celulosa	28
2.2.5.1. Propiedad Física del Rendimiento de los Nanocristales de Celulosa	28
2.2.5.2. Propiedad Física del Color de Cáscara de Tuna	29
2.2.5.3. Propiedad Estructural de la Morfología de los Nanocristales de Celulosa	29
2.2.5.4. Propiedad Estructural de los Grupos Funcionales de los Nanocristales de Celulosa	30
2.2.6 Tratamiento Ácido.....	30
2.3. Marco Conceptual	31
2.3.1 Cáscara de Tuna	31
2.3.2 Celulosa	31
2.3.3 Nanocristales de Celulosa.....	31
2.3.4 Tratamiento Ácido.....	31
2.3.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	32
2.3.6 Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	32
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	33
3.1. Hipótesis	33
3.1.1 Hipótesis General	33
3.1.2 Hipótesis Específicas.....	33
3.2. Identificación de Variables.....	33
3.3. Operacionalización de Variables	33
IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	35
4.1. Lugar de Investigación	35
4.2. Tipo, Nivel y Diseño de Investigación	35
4.3. Unidad de Análisis	36
4.4. Población y Muestra	36
4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de Datos.....	36
4.5.1 Materia Prima e Insumos	36
4.5.2 Materiales y Equipos	36

4.5.2.1. Equipos.....	36
4.5.2.2. Instrumentos y Materiales de Laboratorio	37
4.5.2.3. Software	38
4.5.2.4. Reactivos.....	38
4.5.2.5. Otros Materiales	38
4.5.3 Obtención de Harina de Cáscara de Tuna (Opuntia ficus-indica).....	39
4.5.4 Obtención de Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna (Opuntia ficus-indica)	40
4.5.4.1. Cálculo del Rendimiento.....	42
4.5.4.2. Análisis del Color	42
4.5.4.3. Análisis de la Morfología de los Nanocristales de Celulosa (SEM).....	43
4.5.4.4. Determinación de los Grupos Funcionales (FTIR)	43
4.6. Diseño Experimental	44
4.6.1 Modelo Estadístico	44
4.6.2 Matriz Experimental	45
4.6.3 Técnicas para Demostrar la Veracidad o Falsedad de las Hipótesis	45
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	47
5.1. Rendimiento	47
5.2. Color	49
5.3. Estructura Morfológica (SEM)	55
5.4. Grupos Funcionales (FTIR).....	58
VI. CONCLUSIONES.....	63
VII. RECOMENDACIONES	64
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

pág.

Tabla 1 Composición Lignocelulósica de Algunos Materiales Lignocelulósicos.....	22
Tabla 2 Resultados del Rendimiento de Celulosa de la Hoja de Mazorca de Maíz	28
Tabla 3 Caracterización Fisicoquímica de los Extractos de Cáscara de Tuna	29
Tabla 4 Operacionalización de Variables	34
Tabla 5 Diseño Experimental Factorial.....	44
Tabla 6 Propiedad Física de Color de Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna	45

Tabla 7	<i>Rendimiento de Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna</i>	45
Tabla 8	<i>Rendimiento para los Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna</i>	47
Tabla 9	<i>Análisis de Varianza para el Rendimiento</i>	48
Tabla 10	<i>Medición de Color de los Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna</i>	50
Tabla 11	<i>Análisis de Varianza para la Luminosidad</i>	51
Tabla 12	<i>Análisis de Varianza para el Croma</i>	52
Tabla 13	<i>Análisis de Varianza para la Tonalidad</i>	53

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS		pág.
Figura 1	<i>Estructura de la Pared Celular de la Biomasa Lignocelulósica</i>	22
Figura 2	<i>Precusores Químicos de la Lignina</i>	23
Figura 3	<i>Estructura de la Celulosa</i>	24
Figura 4	<i>Estructura Química de la Hemicelulosa</i>	25
Figura 5	<i>Diagrama de Flujo del Acondicionamiento de Materia Prima</i>	39
Figura 6	<i>Diagrama de Flujo de la Obtención de Nanocristales de Celulosa</i>	40
Figura 7	<i>Gráfica de Interacciones para el Rendimiento</i>	49
Figura 8	<i>Gráfica de Interacciones para la Luminosidad</i>	51
Figura 9	<i>Gráfica de Interacciones para el Croma</i>	53
Figura 10	<i>Gráfica de Interacciones para la Tonalidad</i>	54
Figura 11	<i>Estructura Morfológica del Tratamiento 1 T1(AO/50%)</i>	55
Figura 12	<i>Estructura Morfológica del Tratamiento 2 T2(AO/70%)</i>	56
Figura 13	<i>Estructura Morfológica del Tratamiento 3 (AF/50%)</i>	56
Figura 14	<i>Estructura Morfológica del Tratamiento 4 (AF/70%)</i>	57
Figura 15	<i>Espectros FTIR del Tratamiento 1 (AO/50%)</i>	59
Figura 16	<i>Espectros FTIR del Tratamiento 2 (AO/70%)</i>	60
Figura 17	<i>Espectros FTIR del Tratamiento 3 (AF/50%)</i>	61
Figura 18	<i>Espectros FTIR del Tratamiento 4 (AF/70%)</i>	62

ÍNDICE DE ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS		pág.
Anexo 1	<i>Matriz de Consistencia</i>	70
Anexo 2	<i>Balance de Masa Completo</i>	72
Anexo 3	<i>Fotografías del Área Experimental de la Obtención de Nanocristales de Celulosa</i>	74

ABREVIATURAS

CNC = Nanocristales de Celulosa (Cellulose Nanocrystals)

CH_3COOH = Ácido acético

ClO_2 = Dióxido de cloro

NaOH = Hidróxido de sodio

KOH = Hidróxido de potasio

$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ = Ácido oxálico

HF = Ácido fluorhídrico

Statgraphics XVI = Paquete estadístico para análisis experimental

CIELab = Espacio de color definido por la Comisión Internacional de Iluminación

SEM = Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscopy)

FTIR = Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

H_2SO_4 = Ácido sulfúrico

H_3PO_4 = Ácido fosfórico

HCl = Ácido clorhídrico

t = Tiempo

T = Temperatura

V = Velocidad (en agitador magnético en rpm)

rpm = Revolución por minuto

mL = Mililitro

mm = Milímetros

nm = Nanómetros

v/v y m/v = Concentración volumen-volumen y masa-volumen

g = Gramos

min = Minutos

h = Horas

$^{\circ}\text{C}$ = Grados centígrados

kHz = Kilohercio

pH = Potencial de hidrógeno

C = Croma

h° = Tonalidad

AGRADECIMIENTO

Con profunda estima y reconocimiento, extendemos nuestra más sincera gratitud a nuestra asesora de tesis, la Msc. Ing. Antonieta Mojo Quisani. Su dedicación docente y su inestimable guía ha sido pilar fundamental en la dirección y enriquecimiento de esta investigación.

Expresamos nuestro agradecimiento a los dictaminantes de tesis, la Dra. Ing. María Mercedes Carrasco Colque y la Dra. Luz Marina Aparicio Peña, cuyas perspicaces observaciones y constructivos comentarios han sido cruciales para la consolidación de este trabajo de investigación.

Nuestra gratitud más sincera a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Filial Sicuani, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, bastión de excelencia académica en nuestra formación académica y profesional.

Nuestro agradecimiento al Dr. Melquiades Barragán Condori como jefe de laboratorio y la Ing. Jesusa Arias Gamarra como encargada de laboratorio de la Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba, brindándonos apoyo y guía en los laboratorios de química.

Nuestro agradecimiento a la Dra. Corina Avelina Vera Gonzales y el Dr. Elmer Antonio Mamani Calcina, directores de los laboratorios de materiales de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, brindándonos apoyo y guía en los laboratorios de ciencia y materiales.

A nuestros seres queridos, quienes con su amor incondicional, apoyo constante y palabras de aliento nos impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también es suyo.

A cada uno de ustedes, nuestro más profundo agradecimiento por su invaluable contribución a este viaje académico.

DEDICATORIA

A mi madre Marina Salas Mamani y mi tía Carmen Rosa Vasquez Mamani, por su apoyo continuo y motivación incondicional para la culminación de esta investigación redactada como prueba de que me seguiré esforzando para mantenerlas orgullosas.

A mi hermano Johan Quispe Salas, a quien me está enseñando a ser mejor cada día para mostrarle que las metas se cumplen.

A mis grandes amigos Darwin Enrique Noa Roca, Elmer Choque Chalco y Deysi Rolya Incabueno Ramos, por el tiempo compartido y las risas que me sacaron cuando la motivación hacía falta.

Este trabajo de investigación está dedicado a mi más grande amor Jennifer Thalia Magno Espinoza, por su apoyo, comprensión y cuya presencia fueron un pilar fundamental, por haber sido una parte importante en el trayecto que hoy culmina en una tesis.

Carlos Alberto Vasquez Salas

DEDICATORIA

A Dios, por guiar mi pasos, iluminar mi camino y darme fortaleza necesaria para superar cada desafío.

A mis padres Feliz Ccacyamarca Huanca y Felicitas Machacca Pfuño por ser pilares fundamentales de mi formación personal y profesional, por su amor incondicional y por los valores que me inculcaron.

A mi hermano Felix Enrique Ccacyamarca Machacca, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y su confianza en mis capacidades.

A mi hermana Nayda Lizeth Ccacyamarca Machacca, por ser mi pilar y mi fortaleza para superar cada desafío.

A todos ellos, les dedico este logro con profundo agradecimiento y cariño.

Ruth Milagros Ccacyamarca Machacca

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo obtener y caracterizar nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna mediante hidrólisis ácida. Tras acondicionar la cáscara, se aplicó hidrólisis con ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y ácido fluorhídrico (HF) a 50 y 70%, durante 20 minutos a 60°C y 700 rpm, seguida de sonicación por 15 minutos a 30°C y 40 kHz. Se empleó un diseño bifactorial de 4 tratamientos con 3 réplicas, analizado con Statgraphics Centurión XVI.

El tratamiento 2 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ al 70%) obtuvo el mayor rendimiento con 72.46%, seguido del tratamiento 4 (HF al 70%) con 68.50%. En el análisis CIELab no hubo diferencias en luminosidad y tonalidad tras los tratamientos; en croma, el tratamiento 2 mostró mejor saturación (18.41) y el tratamiento 3 (HF al 50%) mayor intensidad cromática (27.47), lo que indica que el $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ favorece la saturación y el HF la intensidad cromática.

Mediante SEM, el tratamiento 2 presentó estructura sólida y aglomerada con varillas irregulares y porosidad, mientras el tratamiento 4 mostró una estructura más individual y menos aglomerada. El FTIR confirmó grupos hidroxilo, metileno y éter, característicos de los nanocristales, con estiramientos más definidos en los tratamientos con $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (1 y 2) y más bajos con HF (3 y 4), conservando dichos grupos funcionales.

Se concluye que el rendimiento depende del tipo y concentración de ácido, la hidrólisis modificó el croma y los análisis SEM y FTIR confirmaron la morfología cristalina y la conservación de los grupos funcionales propios de la celulosa de cáscara de tuna.

Palabras claves: Nanocristales, Celulosa, Cáscara de tuna, Hidrólisis ácida.

ABSTRACT

This work aimed to obtain and characterize cellulose nanocrystals from tuna peel by acid hydrolysis. After conditioning the shell, hydrolysis was applied with oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) and hydrofluoric acid (HF) at 50 and 70%, for 20 minutes at 60°C and 700 rpm, followed by sonication for 15 minutes at 30°C and 40 kHz. A bifactorial design of 4 treatments with 3 replicas was used, analyzed with Statgraphics Centurion XVI.

Treatment 2 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ at 70%) achieved the highest yield with 72.46%, followed by treatment 4 (HF at 70%) with 68.50%. In the CIELab analysis there were no differences in luminosity and tonality after the treatments; in chroma, treatment 2 showed better saturation (18.41) and treatment 3 (HF at 50%) greater chromatic intensity (27.47), which indicates that $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ favors saturation and HF chromatic intensity.

Using SEM, treatment 2 presented a solid and agglomerated structure with irregular rods and porosity, while treatment 4 showed a more individual and less agglomerated structure. The FTIR confirmed hydroxyl, methylene and ether groups, characteristic of nanocrystals, with more defined stretches in treatments with $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ (1 and 2) and lower with HF (3 and 4), preserving these functional groups.

It is concluded that the yield depends on the type and concentration of acid, the hydrolysis modified the chroma and the SEM and FTIR analyzes confirmed the crystalline morphology and the conservation of the functional groups of tuna shell cellulose.

Keywords: Nanocrystals, Cellulose, Tuna peel, Acid hydrolysis.

INTRODUCCIÓN

La obtención de los nanocristales de celulosa y su uso adecuado de los componentes a graduación nanométrica es valiosa para múltiples aplicaciones en ciencia e industria, estos materiales destacan por su biodegradabilidad, alta resistencia mecánica, baja densidad y propiedades ópticas únicas, se puede decir que, entre el nivel clásico macromolecular que está aplicado en la Química tradicional y la Física; el nivel atómico donde se ubica las reglas singulares de la Mecánica Cuántica (Jurvetson, 2004). La conducta particular de los componentes a graduación nanométrica que presenta posibilidades atractivas para el proceso de elaboración a un costo más reducido de moléculas singulares, la producción de grandes cantidades de microfibras y de luz, del mismo modo la producción de detectores ultrasensibles (Ratner & Ratner, 2007). La nanotecnología se ubica hoy en día en un periodo de comienzo especulativo; se encuentran muy pocos hallazgos nanotecnológicos que se han transformado en productos comerciales realmente. En cambio, las expectativas al campo de acción son ilimitadas y van desde la ilusión de obtener grandes cantidades de componentes y energía gratuita que se transformará según K. Eric (1986) y Neal S. (1995) en “principales motores de crecimiento de la economía” en un futuro indirecto hasta una gran amenaza de catástrofes medioambientales.

El trabajo de investigación se tiene como objetivo la obtención de los nanocristales de celulosa a partir de la cáscara de tuna con la utilización del método del tratamiento ácido y después por asistencia de sonicación.

La nanotecnología es la aplicación de la ciencia por la cual se posibilita la creación de pequeños materiales, dispositivos o estructuras a un tamaño de nanométrico, que poseen propiedades muy interesantes. Resulta valioso recalcar que las características de los materiales que se conocen han de variar a nivel de nanométrico, supuesto que acceden en el juego de factores según como los efectos cuánticos o la superficie específica. Beneficio del estudio de la investigación de la nanociencia y la naturaleza, actualmente resulta muy posible el conocimiento sobre las características de los materiales a nivel de nanométrico, por tal razón, la aplicación de la nanotecnología está en una gran diversidad de campos (Ashby, 2009).

El tratamiento ácido se sabe que se aplica sobre la biomasa lignocelulósica que llega como resultado de una mejora donde se obtienen los azúcares fermentables. De los cuales están los ácidos como el ácido fosfórico (H_3PO_4), el ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido clorhídrico (HCl) que se utilizan para el tratamiento con los materiales de lignocelulosa. La

temperatura es variable y la condición de concentración (Morales de la Rosa et al., 2012, 2014). Del cual el proceso que se utiliza, para la obtención de una fracción líquida, que contiene gran cantidad de azúcares fermentables, así como en la fracción sólida que está conformada por lignina y celulosa. El tratamiento con ácido ha de ser eficiente para la disipación de la hemicelulosa. En cambio, el método no llega a tener buen resultado para la eliminación de la lignina. En cambio, llegan a ser muy efectivo en la hidrólisis de la celulosa, para estos ácidos tóxicos concentrados, peligrosos y corrosivos, se necesitan de procesos que tenga la resistencia a la corrosión, lo que provocaría una exageración de elevados costos (Kumar, 2009).

Este trabajo de investigación se limita al uso en su metodología sobre el cual se consideran que va a tener relación al ácido que se va a utilizar en el proceso de la hidrólisis ácida con el uso del ácido oxálico y el ácido fluorhídrico lo cual se va a usar en diferentes concentraciones lo cuales serían las concentraciones de 50% y 70% respectivamente.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

En el Perú existen diversos productos que sirven como materia prima para la Agroindustria, en la actualidad se busca el desarrollo de una agroindustria sostenible, pero la mayoría de estos productos aún no son procesados industrialmente, es el caso de la cáscara de tuna que es el fruto del cladodio de nopal; en la región del Cusco y nivel nacional no se le da un valor agregado a la cáscara de tuna el cual es un residuo orgánico. Las principales zonas de producción de tuna son los departamentos de Ayacucho, Lima y Cusco (López y Díaz, 2018). La cáscara de tuna tiene un alto contenido de celulosa, en un 27% de celulosa en peso seco (Habibi et al., 2004) y 31.60% de celulosa en peso húmedo (Orrabalis, 2020).

Los residuos agroindustriales como la cáscara de tuna, es muy poco aprovechado y que generalmente es desechado que viene a ser foco de contaminación en el medio ambiente.

La importancia de determinar las propiedades de los nanocristales de celulosa es para determinar el uso que se le va a dar, según sus propiedades pueden ser utilizados en la cosmética, la farmacéutica, la electrónica, la papelería, el recubrimiento de alimentos, los envases biodegradables, películas biodegradables y otros.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo influye la hidrólisis ácida asistida mediante sonicación sobre la obtención de los nanocristales de celulosa y la caracterización a partir de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*)?

1.2.2 Problemas Específicos

1. ¿Cuál es el efecto de la hidrólisis ácida en el rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna?
2. ¿Cómo influye la hidrólisis ácida sobre el color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna?
3. ¿Cuál es la caracterización de la estructura morfológica mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)?
4. ¿Cómo influye la hidrólisis ácida sobre los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Obtener y caracterizar nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*) mediante hidrólisis ácida.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la influencia de la hidrólisis ácida en el rendimiento de los nanocristales de celulosa.
2. Analizar el efecto de la hidrólisis ácida en el color de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.
3. Caracterizar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).
4. Evaluar e identificar los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de la cáscara de tuna mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

1.4. Justificación de Estudio

Con esta investigación se desea brindar un valor agregado a la cáscara de tuna y aplicar la nanotecnología utilizando el método de la hidrólisis ácida para la obtención de nanocristales de celulosa de la cáscara de tuna, que en la región del Cusco y a nivel del Perú es desechada, por lo que se quiere utilizar como materia prima la cáscara de tuna, transformándolo mediante los distintos procesos para la obtención de los nanocristales de celulosa, y analizar las características que presenta.

En el Perú no se le da un valor agregado a la cáscara de tuna, en muchas regiones del país existe un gran crecimiento de nopal silvestre que tiene como fruto la tuna, al cual no se le da la debida importancia, pero al darle un valor agregado esta podría adquirir un valor y ser una fuente de ingreso para las personas que se dediquen a la comercialización de la tuna.

La presente investigación busca aportar un valor científico y tecnológico al estudio de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*), un residuo agroindustrial abundante. Mediante la aplicación de la hidrólisis ácida asistida por sonicación, se pretende obtener nanocristales de celulosa, contribuyendo al conocimiento sobre la transformación de biomasa residual en materiales de alto valor agregado. Este enfoque no solo permitirá comprender la influencia de diferentes condiciones de reacción en las propiedades físicas y estructurales de los nanocristales, sino también

demostrar su potencial como refuerzo en películas biodegradables y recubrimientos alimentarios. De esta manera, el estudio se inserta en el campo de la nanotecnología aplicada a la sostenibilidad, ofreciendo una alternativa científica para el reemplazo de envases plásticos y generando un impacto tecnológico con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y de materiales.

II. MARCOTEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Antecedentes de la investigación

Peralta, S., & Elizabeth, S. (2021) desarrollaron la investigación titulada **“Obtención de nanocelulosa a partir de la hoja de mazorca de maíz (*Zea mays L.*) mediante hidrólisis ácida”** en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador), con el objetivo de obtener nanocelulosa a partir de residuos agrícolas. La metodología comprendió tratamientos químicos y físicos (blanqueo y alcalinización) para la obtención de celulosa, evaluando seis experimentos con variaciones de temperatura y concentración de NaOH. El mejor rendimiento (38,94%) y pureza (91,51% de α -celulosa) se obtuvo en el experimento E5. La nanocelulosa fue sintetizada mediante hidrólisis ácida con H_2SO_4 al 65% y tratamiento de ultrasonido durante 1 hora. El análisis FTIR confirmó la presencia de grupos funcionales característicos de la celulosa, mientras que las micrografías SEM revelaron estructuras fibrilares con diámetros de 10 a 50 nm. Como conclusión, el tratamiento combinado de hidrólisis ácida (65%) y ultrasonido fue el más eficaz para obtener nanocelulosa con alta transmitancia (90,78%) y morfología homogénea.

Galarza Esparza y Mena Díaz (2021) desarrollaron la investigación titulada **“Obtención de nanocelulosa mediante la hidrólisis ácida de la cáscara de *Solanum tuberosum*”** en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador), con el objetivo de valorizar residuos agroindustriales a través de la obtención de nanocelulosa. La metodología comprendió la recolección, caracterización y análisis composicional de la cáscara de papa, determinando un contenido de celulosa del 22,2% y humedad del 86,1%. Posteriormente, se aplicó la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico en concentraciones de 4 a 6 M, a temperaturas de 50–70 °C durante 50 minutos. El análisis FTIR evidenció bandas características de los grupos O–H (3335 cm^{-1}), C–H (2917 cm^{-1}), C–CH₃ (1367 cm^{-1}) y C–O (1160 cm^{-1}), confirmando la presencia de enlaces celulósicos. Las micrografías SEM mostraron estructuras fibrilares con diámetros entre 30 y 11450 nm, representativas de nanocelulosa. Se concluyó que las condiciones óptimas para obtener nanocelulosa correspondieron al tratamiento con ácido sulfúrico 6 M a 50 °C, recomendándose ajustar el tiempo de reacción y la concentración del ácido para optimizar el rendimiento.

Santos Lema y Silva Arroyo (2019) desarrollaron la investigación **“Obtención de nanocelulosa a partir de cascarilla de arroz mediante hidrólisis ácida”** en la Universidad de Guayaquil, con el objetivo de valorizar la cascarilla de arroz mediante la obtención de nanocelulosa. La metodología incluyó la extracción de celulosa mediante hidrólisis básica con

NaOH al 5%, 15% y 20%, seguida de un proceso de blanqueamiento con hipoclorito de sodio al 1% y eliminación de hemicelulosas con HCl al 0,65%. Posteriormente, la celulosa fue sometida a hidrólisis ácida con H_2SO_4 al 64%, a 45 °C durante 45 minutos. El análisis FTIR confirmó los grupos funcionales característicos de la celulosa tras el proceso de purificación. Las micrografías SEM mostraron nanocristales con morfologías alargadas y tamaños entre 5×10 nm y 100×500 nm, evidenciando la obtención de estructuras nanométricas homogéneas. En términos de ciertos atributos ópticos y colorimétricos, las muestras presentaron un color claro derivado del eficiente blanqueamiento. Se concluyó que las mejores condiciones para obtener nanocelulosa correspondieron al uso de NaOH al 5% y ácido sulfúrico al 60–64%, logrando cristales con longitudes de hasta 100 nm y diámetros entre 5 y 10 nm; adicionalmente, el estudio evidenció viabilidad económica con una tasa de retorno del 13%.

Teixeira et al. (2010) desarrollaron la investigación **“Nanofibras de algodón obtenidas bajo diferentes condiciones de hidrólisis ácida”** en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología para la Agroindustria de São Carlos, con el objetivo de evaluar las propiedades termoestables de nanofibras de celulosa para su aplicación en polímeros sometidos a altas temperaturas. La metodología consistió en la extracción de nanofibras a partir de algodón comercial mediante hidrólisis con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y una mezcla de ambos. Las nanofibras obtenidas fueron caracterizadas mediante microscopía de transmisión para evaluar la morfología, análisis elemental y difracción de rayos X para determinar la cristalinidad, además de pruebas de estabilidad térmica en atmósfera de aire. Los resultados mostraron que la morfología y cristalinidad fueron similares independientemente del ácido empleado; sin embargo, se observaron diferencias significativas en la estabilidad térmica y el estado de agregación, siendo este último mayor en las nanofibras tratadas con ácido clorhídrico, hecho asociado al incremento de la carga superficial según el potencial zeta. Se concluyó que la combinación de HCl con H_2SO_4 mejora notablemente la estabilidad térmica respecto al uso exclusivo de ácido sulfúrico, mientras que para obtener una mejor dispersión y menor agregación resulta más adecuado el empleo de HCl.

Vidales Carrillo (2019) desarrolló la investigación **“Métodos de extracción de nanocelulosa a partir de residuos de Agave spp.”** en la Universidad Tecnológica del Valle de Toluca (México), con el objetivo de identificar el método más adecuado para obtener nanocelulosa a partir de Agave tequilana Weber, A. salmiana y A. angustifolia, promoviendo además el aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales. La metodología incluyó la recolección y

secado de hojas, el aislamiento de la celulosa mediante extracción etanol-agua para remover lignina, seguido de blanqueo sin cloro. La nanocelulosa se obtuvo por hidrólisis ácida asistida por sonicación usando H_2SO_4 10.2 M a 45 °C durante 60 minutos, complementada con desfibrilación mecánica por homogeneización a alta presión durante 90 minutos. La caracterización mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) permitió observar nanofibras con dimensiones homogéneas, mientras que la difracción de rayos X (DRX) evidenció altos índices de cristalinidad. Los resultados mostraron que los residuos de agave presentan buen rendimiento para la obtención de nanocelulosa y propiedades morfológicas, cristalinas y coloidales adecuadas. Se concluyó que los subproductos generados en la producción de tequila, pulque y mezcal constituyen una fuente viable y ambientalmente favorable para producir nanocristales y nanofibras de celulosa.

García et al. (2021) realizaron la investigación **“Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido de nanocelulosas de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)”** en la Universidad Peruana Unión y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con el objetivo de obtener y caracterizar morfológicamente nanocelulosa extraída de cáscara de sandía. La metodología comprendió un tratamiento alcalino inicial con KOH al 5%, seguido de un blanqueamiento con clorito de sodio a 80 °C durante 4 h, y finalmente una hidrólisis ácida con H_2SO_4 en concentraciones de 50%, 60% y 70%, aplicadas por 20, 30 y 40 min a 45 °C bajo agitación constante. El análisis proximal de la harina de cáscara reportó 10,30% de humedad, 15,00% de ceniza, 10,00% de lignina, 23,00% de hemicelulosa y 46,00% de celulosa. Las muestras tratadas fueron caracterizadas mediante SEM, observándose fibras nanoestructuradas con diferente grado de exposición y separación según el tratamiento ácido aplicado. El rendimiento máximo (64,96%) se obtuvo con ácido sulfúrico al 60% durante 30 min. Se concluyó que la morfología más definida y homogénea se alcanzó en las imágenes tomadas a 200 μm , donde las fibras mostraron mejor dispersión y mayor exposición superficial.

Tofeño Herrera (2021) desarrolló la investigación **“Preparación y caracterización de nanofibras de celulosa (CNF) de la cáscara de plátano (*Musa cavendishii*)”** en la Universidad Nacional de San Agustín (Perú), con el objetivo de obtener y caracterizar nanofibras de celulosa provenientes de cáscaras de plátano para evaluar su concentración y potencial uso industrial. La metodología inició con la inmersión del material en una solución antioxidante de metabisulfito de sodio al 1%, seguido de secado a 60 °C por 24 h y posterior molienda para obtener el salvado. La extracción de celulosa se realizó mediante tratamiento alcalino (NaOH 5%) y posterior

deslignificación con hipoclorito de sodio al 1% ajustado con ácido acético, aplicando tres repeticiones. Finalmente, se empleó hidrólisis ácida con H_2SO_4 al 1% para obtener nanofibras. Los análisis evidenciaron un incremento en la entalpía y en el porcentaje de cristalinidad de las nanofibras respecto a la fibra original. La morfología observada mediante SEM mostró microfibras expuestas y cúmulos en diversas áreas, asociados al grado de ruptura fibrilar. Se concluyó que el control preciso de las variables del proceso y el uso de técnicas de alta resolución, como SEM o TEM, permiten mejorar la visualización y calidad de las nanofibras de celulosa obtenidas.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 Cáscara de Tuna

La cáscara de la tuna posee un alto contenido de compuestos antioxidantes y fibra por este motivo se puede utilizar como un ingrediente funcional para productos cárnicos (Olalde, et al., 2015).

2.2.1.1. Procesamiento de la Cáscara de Tuna

Como primer proceso que se le puede dar a las cáscaras de tuna que son considerados como desechos agroindustriales es encontrar una alternativa en la cual se tenga que dar uso a este desecho y darle un valor agregado, por otro lado se puede considerar en la producción de subproductos de mayor valor tecnológico. Esto puede considerarse como una alternativa de uso, pero solo aplica en una pequeña escala, así como el país de Inglaterra, donde existe la producción de materiales de partes de desecho de destilerías que son usados como para el alimento de los animales, preocupados para bajar el nivel de contaminación que existe en el país, como el más común, que es el desecho de la cebada en la producción de cerveza para la producción de alguna otra biomasa de la misma. En todo caso se debe de considerar las desventajas de un subproducto como es los desechos y la aplicación de acciones de remedio (Herzka y Booth, 1981).

En la etapa final de los enjuagues y baños que se le dan al fruto de la tuna se dan como resultado los desechos sólidos como son la cáscara de la tuna y el producto final que no pasa por las normas de calidad que debe de ser superior al 50% de la materia prima que es procesada (Rocha, L. M., 2006).

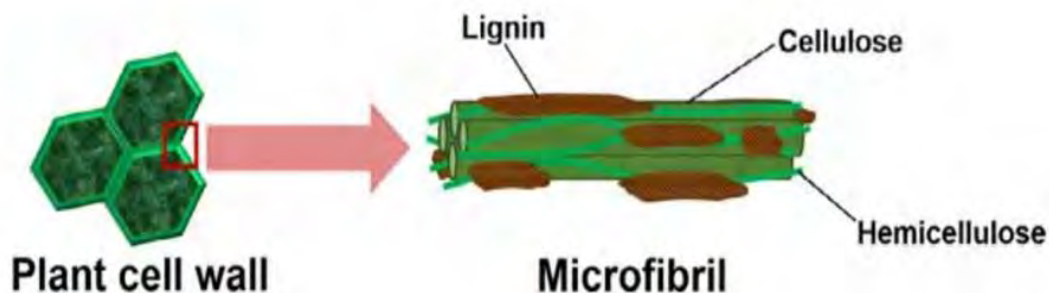
2.2.2 Biomasa Lignocelulósica

Se tiene referencia sobre el material del vegetal en seco, donde se encuentra constituido primordialmente por tres componentes la pared celular: la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, y en una cantidad muy mínima se encuentran las pectinas, ceras, proteínas, cutina y compuestos

grasos. A diferencia, la composición y los porcentajes de los polímeros que conforman han de ser indiferentes entre los tipos de las plantas, la etapa de crecimiento y su edad (Munguia, 2016, p. 5).

Figura 1

Estructura de la Pared Celular de la Biomasa Lignocelulósica



Nota: La figura muestra la estructura de la pared celular de la biomasa lignocelulósica. Fuente: Phanthong et al. (2018), p. 2

Tabla 1

Composición Lignocelulósica de Algunos Materiales Lignocelulósicos

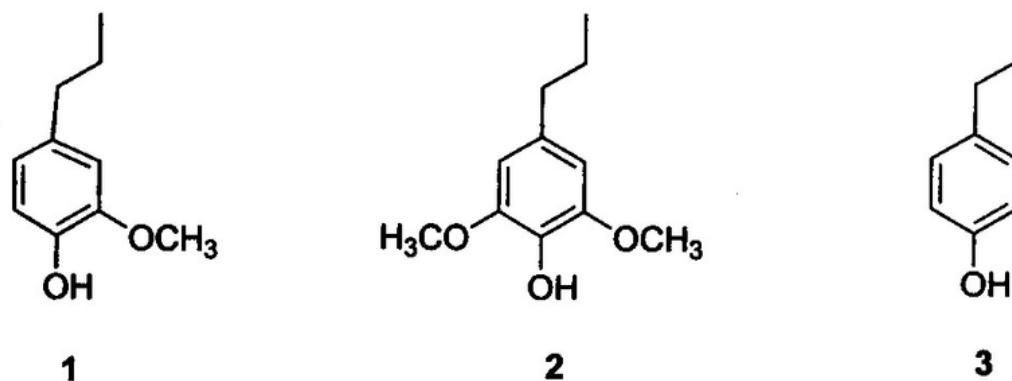
Material	Celulosa (%p/p)	Xilano o Hemicelulosa (%p/p)	Lignina (%p/p)
Pino spp.		Carbohidratos 65.17±0.74	24.45±1.31
Eucalipto spp.		Carbohidratos 69.9±2.11	12.01±0.93
Eucalipto oblicuo	25.77±10	Hemicelulosa 8.25±1.00	43.30±30
Restos de maíz	33.20	Xilano 22.34	16.49
Hierba elefante	34.41±0.96	Xilano 18.48±1.05	16.60±0.42
Opuntia ficus indica	31.60±2.30	Hemicelulosa 17.1±1.2	10.3±0.5
Nopalea cochenillifera	34.9±0.3	Hemicelulosa 20±1.3	15.7±0.2

Nota: La tabla muestra la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina de algunos compuestos lignocelulósicos en el cual está el Nopal (*Opuntia ficus-Indica*) de la fuente Orrabalís, (2020)

2.2.2.1. Lignina

Es uno de los polímeros que hay en gran cantidad sobre la naturaleza, que, en conjunto con la hemicelulosa y celulosa, han de conformar la pared celular de todas las plantas. Tiene la definición de un amorfo copolímero que se subdivide en tres unidades de fenilpropanoides que son: alcohol sinapílico, alcohol p-cumarílico y el alcohol coniferílico (El Mansouri, 2006, p. 1).

La lignina procede como la unión sobre las fibras de la celulosa y proporciona a la planta la rigidez como el soporte estructural, la resistencia al ataque microbiano y la impermeabilidad (Espinoza, 2019, p. 25).

Figura 2*Precursores Químicos de la Lignina*

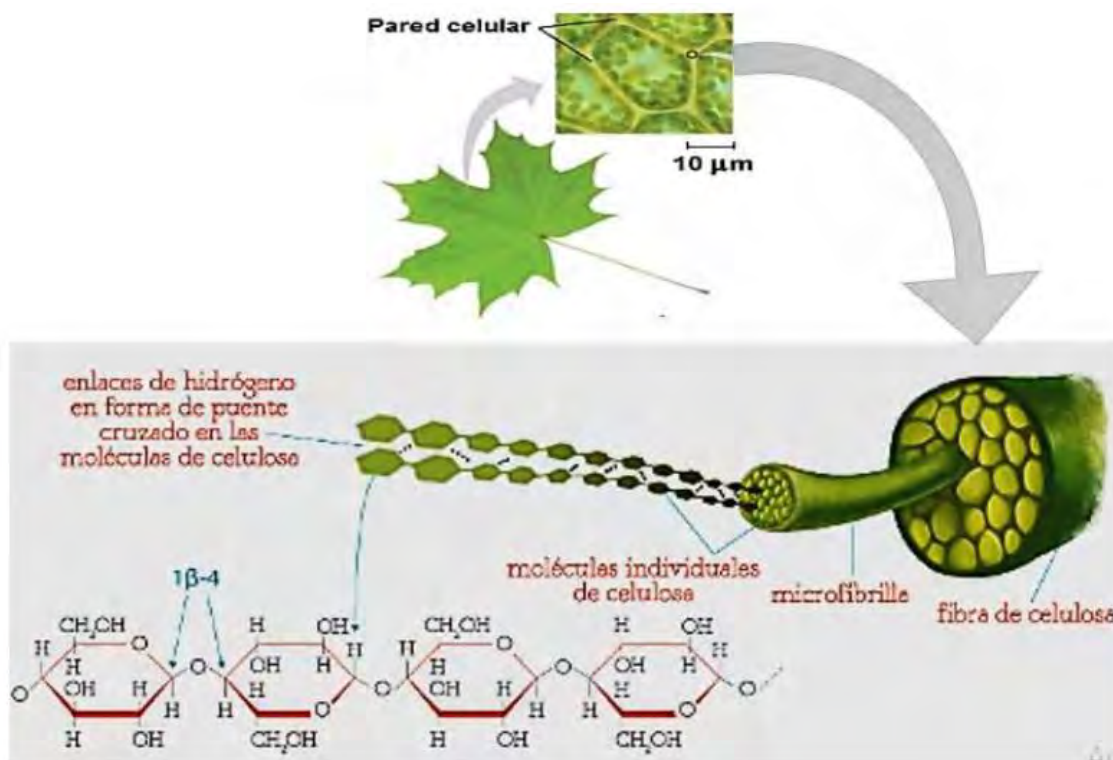
Nota: La figura muestra las estructuras químicas de las principales subunidades constituyentes de las ligninas. (1) guayacilpropano. (2) siringilpropano. (3) p-hidroxifenilpropano. Fuente: Ochoa, J. R. (2007)

2.2.2.2. Celulosa

Es el polímero natural que existe en gran abundancia sobre la tierra y está constituido como el componente de la estructura de las células vegetales. La fórmula general de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$, donde la representación de n es el grado de la polimerización, que puede comprender entre 10.000 a 20.000, y todo esto depende del material que sea la fuente de la celulosa (Börjesson y Westman, 2015, p. 160).

La celulosa es una cadena lineal establecida de repetidas unidades de anillada glucosa que están acopladas entre sí a través de un oxígeno que está unido covalentemente al C4 del anillo contiguo y al C1 de un anillo de glucosa por los enlaces llamados β -1,4-glucosídicos (Yadav et al., 2020, p. 9).

La celulosa es un polisacárido lineal compuesto más abundante en la naturaleza cuya organización en regiones amorfas y cristalinas le proporciona propiedades de resistencia y estabilidad (Pereira Damásio & Santos, 2026, p. 14).

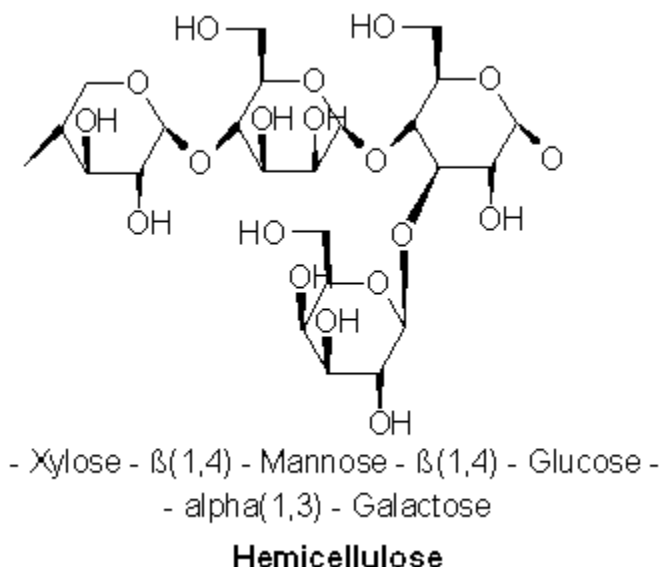
Figura 3*Estructura de la Celulosa*

Nota: La figura muestra la estructura de la celulosa. Fuente: Yadav et al., (2020)

2.2.2.3. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolímero de estructura compleja y ramificada, que está constituida por diferentes polímeros como los azúcares de arabinosa y xilosa que son pentosas, galactosa, manosa y glucosa que son hexosas, fucosa y ramnosa que con ácidos urónicos y las desoxi-hexosas. La hemicelulosa tiene el peso molecular que es inferior a la celulosa y este sirve como un agente para la unión que hay entre las fibras de celulosa y la lignina, que constituye el peso total de la biomasa vegetal entre 25% y 30% (Espinosa, 2019, p. 24).

A diferencia de la estabilidad térmica y química de la hemicelulosa es inferior a la celulosa, por esta razón es soluble en álcalis y se hidroliza con facilidad con ácidos (Carchi, 2014, p. 23).

Figura 4*Estructura Química de la Hemicelulosa*

Nota: La figura muestra la estructura química de la hemicelulosa. Fuente: Bakayoko et al. (2020)

2.2.3 Nanocristales de Celulosa

Se instauró que los residuos agroindustriales son los más aceptables y recomendables para la obtención de nanocristales de celulosa, ya que estos residuos poseen un gran contenido de celulosa dentro de su composición interna, existe una gran producción de estos cultivos en este país, que de este modo se involucra una ventaja al momento de su adquisición de grandes cantidades de estos residuos que no son realmente aprovechados oportunamente. Por parte de la economía, industrialmente la obtención de los nanocristales de celulosa a partir de estos residuos han de requerir una gran inversión, pero tomando en cuenta la gran cantidad que se genera de estos residuos se puede considerar como materia prima, por lo cual se puede permitir una obtención de los nanocristales de celulosa y su desarrollo como aplicación en diferentes ciencias y que también existan personas inversionistas para este desarrollo ya que esta se considera un material nuevo e innovador con gran aplicación y que esta misma posee aceptación en el mercado (Peralta Holguín, 2021).

Los nanocristales de celulosa que son obtenidos mediante la hidrólisis ácida tienden a tener mayor capacidad para formar estructuras cristalinas con alta rigidez y baja densidad, convirtiéndolo en refuerzo adecuado sobre las películas biodegradables como alternativa sostenible de alto valor (Báez Rodríguez, 2021, p. 87).

2.2.4 Tratamientos para la Obtención de los Nanocristales de Celulosa

2.2.4.1. Tratamiento Alcalino

El autor Orrabalís et al. (2020) tuvo que realizar un primer ciclo el cual es el tratamiento alcalino mediante el cual su materia prima es tratada a temperatura ambiente usando una solución acuosa con el hidróxido de potasio (3%p/v) utilizando la proporción 1 g de muestra/12 mL de solución (11.64 mL de H₂O y 0.36 mL de KOH). La muestra se tuvo que agitar constantemente durante un periodo de 30 minutos mediante cocción. Seguidamente se dejó la muestra resultante durante la noche a temperatura ambiente para la obtención de un precipitado. Este resultado se filtró y se lavó con agua destilada hasta que la misma alcance un pH neutro.

El autor Carvalho y Virgens (2018), menciona que la celulosa obtenida mediante el tratamiento alcalino con NaOH tiene la capacidad de eliminar parcialmente la lignina, que este es un componente amorfo dentro de la matriz lignocelulósica, lo cual esta misma hace que la convierta en una muestra con más cristalinidad.

En el uso de la aplicación de los compuestos alcalinos sobre la biomasa lignocelulósica para la eliminación del polímero amorfo de la lignina y la hemicelulosa que se encuentran. Principalmente el álcali que se utiliza es el hidróxido de sodio en diferentes concentraciones en relación a 4-20% sobre el peso, mediante una agitación constante de un periodo de tiempo de 1-5 horas, lo resultante son productos fibrosos que son obtenidos después de este tratamiento donde se encuentran generalmente en forma de celulosa, lo que para después se realiza es el lavado con agua destilada hasta que la misma alcance un pH neutro para que al final se tenga que secar en una estufa a 50°C (Phanthong et al., 2018, p.5).

2.2.4.2. Tratamiento de Blanqueo

Pese a que una gran mayoría de la parte de la lignina se haya eliminado durante el proceso del tratamiento alcalino, lo resultante de este tratamiento aun ha de contener lignina que tiene que ser eliminado mediante el tratamiento del blanqueo en el cual se usa una solución de hipoclorito de sodio en una concentración al 1% con una relación de fibra/solución de 1 g de muestra/10 mL de solución (9.9 mL de H₂O y 0.1 mL de NaClO), este proceso se realiza por un periodo de tiempo de 1 hora a una temperatura de 90°C y esto tiene que estar bajo una continua agitación. Posteriormente la celulosa que se obtiene se filtra y se lava con agua destilada hasta que la misma alcance el pH neutro lo cual esto indica la completa eliminación de la solución con hipoclorito de sodio (Melikoğlu, Bilek y Cesur, 2019, p. 331).

El tratamiento de blanqueo es también llamado el proceso de deslignificación, esta misma tiene gran utilización en la industria de la obtención de la celulosa de diferentes compuestos. Este proceso consiste en la adición de una mezcla de clorito de sodio en agua destilada, así mismo como el ácido acético, todo esto sobre la biomasa lignocelulósica, esto tiene la finalidad de la eliminación de la mayor parte de la lignina así mismo como otros componentes, este tratamiento requiere agitación continua y tiene que estar a una temperatura de entre 70 a 80°C durante un periodo de tiempo determinado, para seguidamente realizar el lavado con agua destilada hasta que la misma alcance un pH neutro. El resultado del tratamiento se seca en una estufa a una temperatura de 50°C, una fibra más como del color blanco que ha obtenido ha de indicar una eliminación exitosa de la lignina y diferentes impurezas (Phanthong et al., 2018, p. 5).

El tratamiento del blanqueo se trata de un tratamiento que es muy ampliamente utilizado para la eliminación de la mayor parte de la lignina que esta es una sustancia que se encuentra en la pared celular de muchos vegetales, lo cual les da una resistencia y dureza, así mismo como otros componentes mientras la ayuda del agua destilada combinada, luego de la agitación constante con el clorito de sodio y ácido acético sobre la biomasa lignocelulósica (Phanthong et al., 2018).

En este proceso del tratamiento del blanqueo, el resultado puede llegar a blanquearse, esto a que existe la eliminación de la lignina residual así mismo como otras impurezas existentes, esto sin cambios en la cristalinidad o en la morfología de la celulosa. Después de este proceso de blanqueo, se tiene como resultado la celulosa blanca con una mejorada resistencia sobre el envejecimiento. En este tratamiento se puede usar varios agentes blanqueadores, de los cuales son, ácido peracético, clorito de sodio, cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno, oxígeno y ozono. Los agentes más usados son el dióxido de cloro y el oxígeno (Kargarzadeh et al., 2017, p. 28).

2.2.4.3. Hidrólisis Ácida

En el trabajo de investigación presentado por Melikoğlu et al. (2019, p. 331), la celulosa que ha sido extraída en polvo se somete a un proceso de hidrólisis ácida con ácido sulfúrico en una concentración del 45%, usando la relación fibra/H₂SO₄ de 1:20, esto durante un periodo de tiempo de 45 minutos y a una temperatura de 50°C en un agitador magnético. Al finalizar este proceso durante el tiempo de la reacción se detiene la hidrólisis ácida o tratamiento ácido y se añade unos cubos de hielo en agua destilada. Para finalmente se realiza la eliminación del H₂SO₄ mediante centrifugación de todas las muestras esto en 5 repeticiones. La sedimentación resultante se separa y se diluye con agua destilada.

La celulosa que se extrae se somete a hidrólisis ácida o tratamiento ácido con H_2SO_4 en una concentración del 65% en relación al peso, esto con agitación mecánica por un periodo de tiempo de 45 minutos y a una temperatura de $45^\circ C$, como resultado se obtiene los nanocristales de celulosa (Rahman et al., 2017, pp. 2–3).

En la obtención de los nanocristales de celulosa se realiza mediante el uso de la aplicación de 2 diferentes metodologías: la primera es por el medio de la hidrólisis ácida o el tratamiento ácido con H_2SO_4 en concentraciones del 60% y 65% esto combinando con ultrasonidos de muy alta intensidad y la segunda es con tratamiento de ultrasonido de muy alta intensidad. Donde se tiene como resultado 3 muestras de nanocristales de celulosa o nanofibras de celulosa (Sanaguano Peralta, 2021).

La hidrólisis ácida o tratamiento ácido es un método químico que implica la digestión de la celulosa usando ácido sulfúrico (H_2SO_4) a una determinada temperatura que va entre los 45 a $60^\circ C$ a un determinado periodo de tiempo que comprende entre 15 a 24 horas, para luego realizar la purificación en una centrifuga, luego de esto se aplica la sonicación que tiene el fin de romper lo que se ha agregado y propagar una suspensión coloidal, para finalmente después de este proceso donde se somete a la muestra a una diálisis con la finalidad de la eliminación de las impurezas así como los iones que poseen bajo peso molecular (Blanco et al., 2018).

2.2.5 Caracterización de los Nanocristales de Celulosa

2.2.5.1. Propiedad Física del Rendimiento de los Nanocristales de Celulosa

El rendimiento de nanocristales de celulosa corresponde al contenido de celulosa residual después de aplicar el tratamiento alcalino con $NaOH$, el tratamiento de blanqueo con $NaClO$ e hidrólisis ácida, con lo que se da la eliminación de lignina, hemicelulosa y otros carbohidratos (Sanaguano Peralta, 2021).

Tabla 2

Resultados del Rendimiento de Celulosa de la Hoja de Mazorca de Maíz

Experimentos	Variables		Peso (g)		Respuesta
	NaOH (%)	Temperatura ($^\circ C$)	Hoja de mazorca maíz	de Nanocristales	
E1	2	19	8,2687	2,6505	30,07
E2	2	50	8,2559	2,7255	33,03
E3	2	90	8,3713	2,7168	27,26
E4	5	19	8,2697	2,8271	34,19
E5	5	50	8,3103	3,2362	38,94
E6	5	90	8,7230	2,3780	32,92

Nota: Los datos son realizados por los autores Sanaguano Peralta, 2021.

2.2.5.2. Propiedad Física del Color de Cáscara de Tuna

Este presenta alta luminosidad (L^* 93.99), croma, C^*ab 14.67 y tonalidad (H^*ab 95.01) lo que indica que este se encuentra en la región amarilla (Khoo et al., 2017).

Tabla 3

Caracterización Fisicoquímica de los Extractos de Cáscara de Tuna

Color	Nopal
L^*	72.1 ± 1.20
a^*	3.63 ± 0.17
b^*	11.23 ± 0.37

Nota: Los datos que se muestra en la tabla son las coordenadas L^* , a^* y b^* de la fuente de (Oalde et al., 2015)

2.2.5.3. Propiedad Estructural de la Morfología de los Nanocristales de Celulosa

La determinación morfológica de los NCC modificados y prístinos a través de MEB donde se presentan fotografías MEB de los NCC prístinos, NCC/2-EHA, NCC/CO respectivamente, donde las imágenes son de las muestras de las soluciones acuosas se dejaron al medio ambiente para su secado sobre unas porta muestras, en las fotografías se muestra un conjunto de conglomerados de NCC prístinos, en otra fotografía se muestra un conjunto de conglomerados en donde los NCC donde poseen una longitud que está en ~ 601 nm con un diámetro que es aparente de ~ 289 nm. Los NCC que hay sido injertados con poli (2-EHA) que muestra una forma irregular en las fotografías, donde se pueden identificar los NCC con longitudes y diámetros de ~ 524 nm y ~ 258 nm respectivamente. Los NCC/CO donde se muestran las fotografías en el SEM se presentan como en varillas de NCC que están recubiertas con una capa de ácido graso que tiene una longitud de ~ 522 nm con un diámetro de ~ 209 nm. En las fotografías que corresponden a nanopartículas que han sido después de haber sido liofilizados, por el cual estos han de poseer unos arreglos diferentes que se podrán observar en las fotografías. Los NCC prístinos han de presentar una estructura lamelar el cual consiste en una gran diversidad de placas delgadas con un espesor de ~ 1.7 nm. No se llegan a observar los NCC que están de forma individual, aglomerados o en fibras de tamaños microscópicos por lo que se sugiere que mientras se realice el proceso de liofilizado de los NCC se tengan que auto ensamblar en unas delgadas placas. La morfología de celulosa que es auto ensamblada ha de depender de su aspecto, enlaces de hidrógeno, cristalinidad, concentración y el cambio de carga superficial de los NCC (Ávila Ramírez et al, 2018).

2.2.5.4. Propiedad Estructural de los Grupos Funcionales de los Nanocristales de Celulosa

Se identifican los grupos funcionales entre los rangos que comprenden entre 3340cm^{-1} , 3290cm^{-1} y 3260cm^{-1} , que corresponden a los estiramientos que son vibracionales de los grupos O-H y los enlaces de los puentes de hidrógeno. Las bandas en 1432cm^{-1} y 2902cm^{-1} son atribuidas sobre los estiramientos de los grupos C-H y CH_2 . Las bandas de 1027cm^{-1} , 1162cm^{-1} y 1432cm^{-1} corresponden respectivamente a C-C, hay estiramiento sobre el puente del enlace glucosídico de las celulosa (C-O-C) y a los estiramientos C-O en las posiciones C-3 y C-6 de la celulosa respectivamente. Sobre los espectros de los estiramientos de NCC – PLA de 2% donde se aprecia una banda de 3000cm^{-1} del modo que hay una muy leve en la formulación de NCC – PLA 2%, esto debido a que en la concentración de los NCC se incrementa. La banda de 1750cm^{-1} representa el grupo C=O de PLA en todos los nanocompuestos. Sobre la intensidad de bandas en 1080cm^{-1} y 1180cm^{-1} que corresponden al grupo C-O de la estructura de los NCC, la misma que aumenta conforme a la concentración de NCC en las formulaciones (Riva Reyes, 2013).

2.2.6 Tratamiento Ácido

El proceso de hidrólisis ácida es muy eficiente para obtener los nanocristales de celulosa porque destruye las regiones amorfas de la celulosa, liberando las regiones cristalinas a nivel nanométrico manteniendo las dimensiones uniformes (Ruiz Deance, 2020, p. 55).

La obtención de los nanocristales de celulosa se realiza mediante la metodología de la hidrólisis ácida donde se utiliza el ácido H_2SO_4 en una concentración del 60% y 65% a una temperatura de 45°C con un periodo de tiempo de 45 minutos con una relación de fibra/ H_2SO_4 de 1:20 (Sanaguano Peralta, 2021).

Para la obtención de los nanocristales se utilizó en la H_2SO_4 con una temperatura de 45°C por un periodo de tiempo de 60 minutos, para que después de realizar la hidrólisis ácida se realice una centrifugación a 10000 RPM a una temperatura de 10°C por un periodo de tiempo de 15 minutos, esto realiza hasta que llegue a un pH de 5-6. Así mismo también se realizó la hidrólisis ácida con H_2SO_4 a una temperatura de 50°C por un periodo de tiempo de 90 minutos, para luego realizar la centrifugación a 3600 RPM por un periodo de tiempo de 15 minutos hasta llegar al pH neutro (Peralta Holguín, 2021).

Se ha reportado que el uso del ácido fosfórico sobre el cáñamo industrial en el cual se usó diferentes condiciones de reacción, cambiando sobre la fuente lignocelulósica de la producción, es decir, sobre el bagazo de caña de azúcar. Con relación al tratamiento del material lignocelulósico,

sobre la hidrólisis ácida es una tecnología que más se utiliza en la obtención de azúcares fermentables (Domínguez et al., 2012).

El bagazo se sometió a una hidrólisis ácida por un periodo de tiempo de 80 minutos donde se le agrega agua acidulada con unos niveles del pH de entre 3, 2.5 y 2, donde también se empleó el ácido clorhídrico, ácido cítrico y el ácido fosfórico en una relación de 50 g de bagazo/3L de agua acidulada a una temperatura de 85°C con una agitación constante (Maldonado y Salazar, 2010).

2.3. Marco Conceptual

2.3.1 Cáscara de Tuna

En relación a la cáscara de tuna, es importante mencionar que la que posee mejor dureza es la cáscara de tunas verdes y es considerable en proporción a la fibra, esto a diferencia de la cáscara de tuna roja que posee una cáscara más suave, de este modo se debe de considerar que la cantidad de fibra dietética en la mermelada de tunas verdes presentan un mayor valor nutricional (Arias y Herrera, 2008).

2.3.2 Celulosa

La celulosa es un carbohidrato complejo, o polisacárido, que consta de 3000 o más unidades de glucosa y está representado por la fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$. Es el principal componente estructural de las paredes celulares de las plantas y es el compuesto orgánico natural más abundante en la Tierra (López Velásquez, 2020).

2.3.3 Nanocristales de Celulosa

Este tipo de partícula son conocidos como “nanowhiskers” por su forma similar a barras o bigotes debido a la estrechez de sus extremos (probable resultado del tratamiento con hidrólisis ácida). En la literatura se encuentra con varios nombres como: celulosa nanocristalina, nanowhiskers, microcristales y triquitas de celulosa. Sus dimensiones oscilan entre 3-5 nm de ancho y 50-500 nm de longitud. Están compuestas por celulosa, de una estructura altamente cristalina entre un 54-84% y una alta fracción de estructura cristalina $I\beta$ de 68-94% (Troya R., 2019).

2.3.4 Tratamiento Ácido

La hidrólisis ácida tiene uso para la extracción de las partículas cristalinas de diferentes fuentes de celulosa. En el proceso se hidrolizan los territorios amorfos que se ubican dentro de las microfibrillas de celulosa y los territorios en orden se quedan como los remanentes, este proceso

se produce con el uso de ácidos muy fuertes e inorgánicos así también ácidos menos fuertes y orgánicos como por ejemplo el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido bromhídrico, ácido fosfórico, ácido fluorhídrico, ácido acético, ácido oxálico y ácido nítrico (Du et al., 2019, p. 131).

2.3.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) se utiliza para la caracterización morfológica de los nanocristales de celulosa que se obtienen mediante la hidrólisis ácida, método que nos proporciona imágenes de alta definición de la estructura superficial a una escala nanométrica dando detalles sobre la distribución, forma, tamaño y uniformidad (Ruiz Deance, 2020, p. 63).

2.3.6 Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) se utiliza para identificar los grupos funcionales presentes en los nanocristales de celulosa obtenidos mediante hidrólisis ácida y evaluar los cambios estructurales, mediante vibraciones moleculares de la técnica para correlacionar las modificaciones químicas afectadas por el tratamiento ácido mediante picos con valores para cada grupo funcional (Báez Rodríguez, 2021, p. 92).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis General*

La hidrólisis ácida influye en la obtención y caracterización de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*).

3.1.2 *Hipótesis Específicas*

1. La hidrólisis ácida afecta en el rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.
2. La hidrólisis ácida influye en el color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.
3. La estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna se caracterizan mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).
4. Los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna se identifican mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

3.2. Identificación de Variables

3.2.1 *Variables Independientes*

Hidrólisis ácida

- Ácido oxálico al 50% m/v (1 g de muestra/5 g $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ y 5 mL de H_2O)
- Ácido oxálico al 70% m/v (1 g de muestra/7 g $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ y 3 mL de H_2O)
- Ácido fluorhídrico al 50% v/v (1 g de muestra/5 g HF y 5 mL de H_2O)
- Ácido fluorhídrico al 70% v/v (1 g de muestra/7 g HF y 3 mL de H_2O)

3.2.2 *Variables Dependientes*

- Rendimiento de los nanocristales de celulosa
- Color de los nanocristales de celulosa
- Morfología de los nanocristales de celulosa
- Grupos funcionales de los nanocristales de celulosa

3.3. Operacionalización de Variables

La operacionalización de variables se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4
Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Instrumento de Medición	Unidad	Tipo de Variable
Ácido oxálico al 50% m/v (Independiente)	Ácido orgánico débil que se ioniza parcialmente en solución acuosa.	Preparación de 1 g en 10 mL de agua (50% m/v).	Concentración establecida	Registro de preparación	% m/v	Independiente
Ácido oxálico al 70% m/v (Independiente)	Igual que anterior, pero con mayor concentración.	Preparación de 1 g en 10 mL de agua (70% m/v).	Concentración establecida	Registro de preparación	% m/v	Independiente
Ácido fluorhídrico al 50% v/v (Independiente)	Ácido fuerte que se ioniza completamente en solución acuosa.	Preparación de 1 g en 10 mL de agua (50% v/v).	Concentración establecida	Registro de preparación	% v/v	Independiente
Ácido fluorhídrico al 70% v/v (Independiente)	Igual que anterior, pero con mayor concentración.	Preparación de 1 g en 10 mL de agua (70% v/v).	Concentración establecida	Registro de preparación	% v/v	Independiente
Rendimiento de CNC (Dependiente)	Relación entre el peso inicial de celulosa y el peso final de nanocristales obtenidos (Canada Beef, s.f.).	% rendimiento = (peso final / peso inicial) × 100.	Bajo (<10%), medio (10–20%), alto (20–30%).	Balanza analítica	%	Ordinal Categórico
Color de CNC (Dependiente)	Medición en espacio CIE Lab* (Konica Minolta, 2006).	Evaluación con colorímetro.	Luminosidad, croma, ángulo.	Espacio CIELab*	0–100 / 0°–360°	Continuo
Morfología de CNC (Dependiente)	Forma y tamaño observados mediante microscopía electrónica de barrido (Santos Lema, 2019).	Imágenes SEM.	Diámetro, longitud, forma.	Microscopio SEM	nm	Continuo / cualitativo nominal
Grupos funcionales de CNC (Dependiente)	Identificación de grupos químicos mediante espectros FTIR (Santos Lema, 2019).	Espectros FTIR con picos característicos.	Número de onda (>1000 cm ⁻¹), transmitancia.	Espectroscopía FTIR	cm ⁻¹	Continuo

Fuente: Elaboración propia (v/v= volumen/volumen, m/v=masa/volumen)

IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Lugar de Investigación

El presente trabajo de investigación “OBTENCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA Y CARACTERIZACIÓN A PARTIR DE CÁSCARA DE TUNA (*Opuntia ficus-Indica*)”, las distintas actividades se llevaron a cabo en:

- Laboratorio de Investigación e Innovación de Productos Agroindustriales, de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco; se realizó el molido para la obtención de harina de cáscara de tuna, se realiza el pretratamiento de la harina de cáscara de tuna y la obtención de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.
- Laboratorio de Investigación e Innovación de Productos Agroindustriales, de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco; se realizó el análisis del rendimiento y la medición del color en el espacio CIELab de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.
- Laboratorio de microscopía electrónica de la Escuela Profesional de Materiales de la Universidad Nacional San Agustín del distrito de Arequipa, de la provincia de Arequipa, región Arequipa; se realizó el análisis de microscopía electrónica de barrido de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.
- Laboratorio de química de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco del distrito de Cusco, de la provincia de Cusco, región Cusco; se realizó el análisis de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

4.2. Tipo, Nivel y Diseño de Investigación

Este trabajo de investigación es del tipo de investigación aplicada y experimental con diseño bifactorial con 3 repeticiones, aplicada donde se utiliza ácidos que no han sido utilizado en otro trabajo de investigación, así como el uso de una metodología para la obtención de nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna, experimental por la manipulación del tipo de ácidos (ácido oxálico y ácido fluorhídrico) y su concentración (50% y 70%) y durante la hidrólisis ácida.

Este trabajo de investigación tiene diseño de investigación de experimentación cuantitativa, para la obtención de nanocristales de celulosa de cáscara de tuna y su posterior caracterización. De

este modo es que se determinan las características físicas (color y rendimiento) y estructurales (SEM y FTIR), por el medio de uso de los equipos e instrumentos que dan como resultados cuantitativos y cualitativos.

4.3. Unidad de Análisis

Son los nanocristales de celulosa a partir de la harina de cáscara de tuna.

4.4. Población y Muestra

Los residuos agroindustriales de cáscara de tuna que son utilizados para la obtención de nanocristales de celulosa, las cáscaras de tuna de la variedad de cáscaras rojas del mercado la bombonera del distrito de Sicuani en la Provincia de Canchis, del departamento de Cusco.

La muestra comprende a las cáscaras de tuna seleccionadas que se usaron para la obtención de los nanocristales de celulosa por hidrólisis ácida con el uso de dos tipos de ácido, diferente concentración de ácido y con asistencia de sonicador.

4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de Datos

4.5.1 *Materia Prima e Insumos*

La cáscara de tuna de variedad de color rojo se obtuvo en el mercado la bombonera del distrito de Sicuani, provincia de Canchis, Cusco, Perú.

Por trazabilidad, la cáscara de tuna fue cosechada en el distrito de Huamanguilla en la provincia de Huanta del departamento de Ayacucho y debido a la dinámica del comercio mayorista agrícola, los frutos cosechados en esta zona son distribuidos y transportados hacia los principales centros y mercados de abastecimiento del sur del país, incluidos los mercados de la ciudad de Sicuani.

4.5.2 *Materiales y Equipos*

4.5.2.1. Equipos

- Centrifugadora Modelo VE4000-995308112 /VELAB USA (rango de velocidad de 100 a 4000 rpm, temporizador de 1 a 99 min, capacidad de 6 tubos y alimentación eléctrica de 110V - 240V/50 - 60Hz)
- Agitador magnético con placa calefactora CAT N6.1 (rango de velocidad de 80 a 1600 rpm, temperatura 5°C a 330°C, potencia de calefacción de 500W y alimentación eléctrica de 115V – 230V/50 - 60Hz)

- Balanza analítica clásica Pioneer Plus/ Marca OHAUS PA224C (capacidad máxima de 220 g, precisión de 0.0001 g, tiempo de estabilización de 3 segundos y alimentación eléctrica de 100V – 240V/50 - 60Hz)
- Estufa de secado al vacío EV-50 (capacidad de la cámara de 50 L, temperatura de 35°C hasta 200°C, potencia de calefacción de 500W y alimentación eléctrica de 230V/50 - 60Hz)
- Campana extractora de gases CSD180 (velocidad de flujo de aire de 0.3 a 0.8 m/s, apertura de guillotina de vidrio templado de 35cm abierto a 60cm cerrado, nivel de ruido menor a 60dBA y alimentación eléctrica de 220V/60Hz)
- Digital ultrasonic cleaner UC-100A BIOBASE (rango de frecuencia de 40 – 60 kHz, temperatura de 20°C a 80°C, potencia de calefacción 1000W, temporizador de 1 a 99 min, y alimentación eléctrica de 110V – 220V/50 - 60Hz)
- Molino planetario de bolas PM 100 – Retsch (granulometría inicial de hasta 10 mm, granulometría final 0.001 mm, rango de velocidad de 100 a 650 rpm, volumen máximo de la muestra 220 g y alimentación eléctrica de 100V – 240V/50 - 60Hz)
- Scios 2 DualBeam FIB-SEM (voltaje de aceleración a 5 kV, resolución del Haz de 0.7 nm a 1 kV y 0.6 nm a 15 kV, voltaje de entrada de 220V CA)
- Sputter Coater (espesor de película 1 nm a 100 nm, corriente de pulverización de 10mA a 50mA y alimentación eléctrica de 100V – 240V/50 - 60Hz)
- Bruker IFS 66v (rango espectral de 12000cm⁻¹ a 20cm⁻¹, presión de vacío interno de 2mbar y alimentación eléctrica 115V – 230V/50 - 60Hz)

4.5.2.2. Instrumentos y Materiales de Laboratorio

- Matraz Erlenmeyer 500 mL
- Probeta graduada
- Embudo
- Piseta
- Tubos de centrifugadora de polipropileno
- Pipetas
- Varillas de vidrio
- Mortero ágata

- Vasos precipitados
- Placas Petri
- Termómetro digital

4.5.2.3. Software

- Statgraphics Centurion XVI
- Kalliope – Anton Paar GmbH
- Espectroscopía OMNIC
- Color Meter App

4.5.2.4. Reactivos

- Hidróxido de potasio (KOH)
- Hipoclorito de sodio (NaClO)
- Ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)
- Ácido fluorhídrico (HF)
- Agua destilada (H_2O)

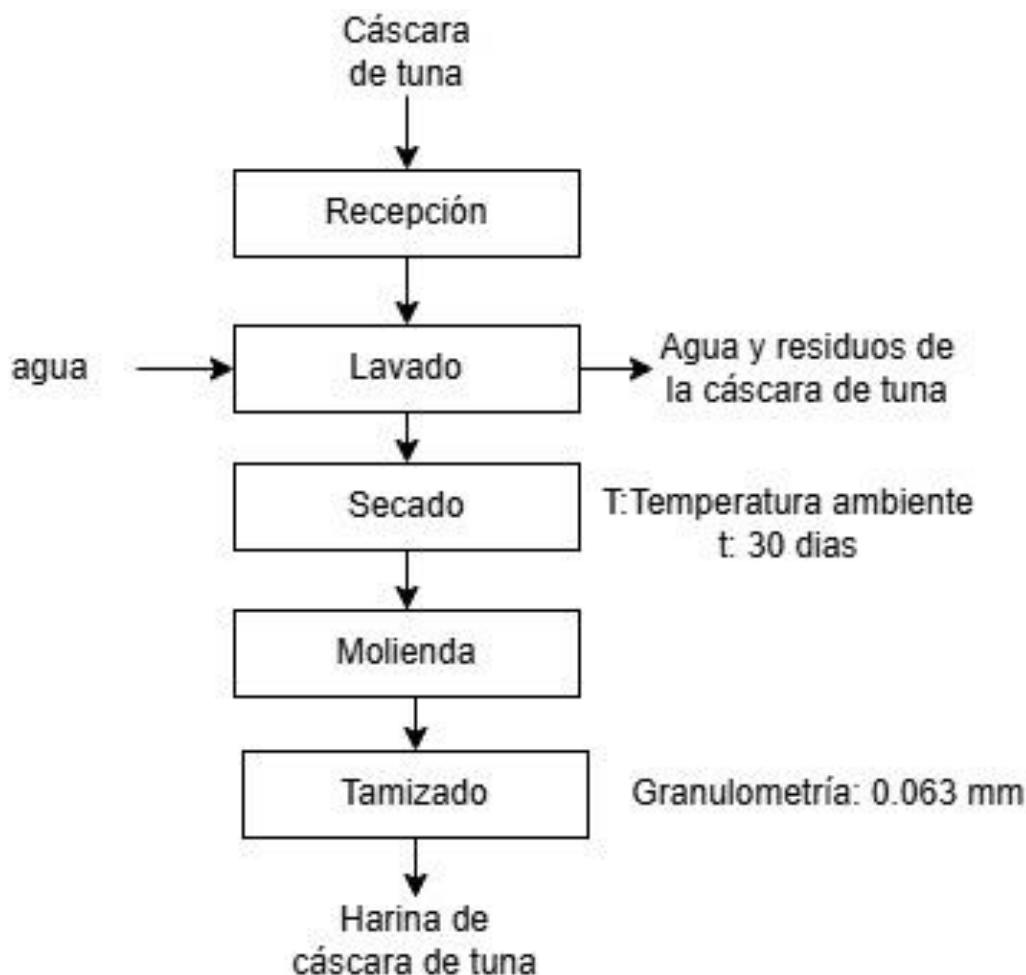
4.5.2.5. Otros Materiales

- Cuchillos
- Tabla de picar
- Bandejas
- Bol
- Baldes de plástico
- Tela de filtro fino
- Coladores
- Papel filtro

4.5.3 Obtención de Harina de Cáscara de Tuna (*Opuntia ficus-indica*)

Figura 5

Diagrama de Flujo del Acondicionamiento de Materia Prima

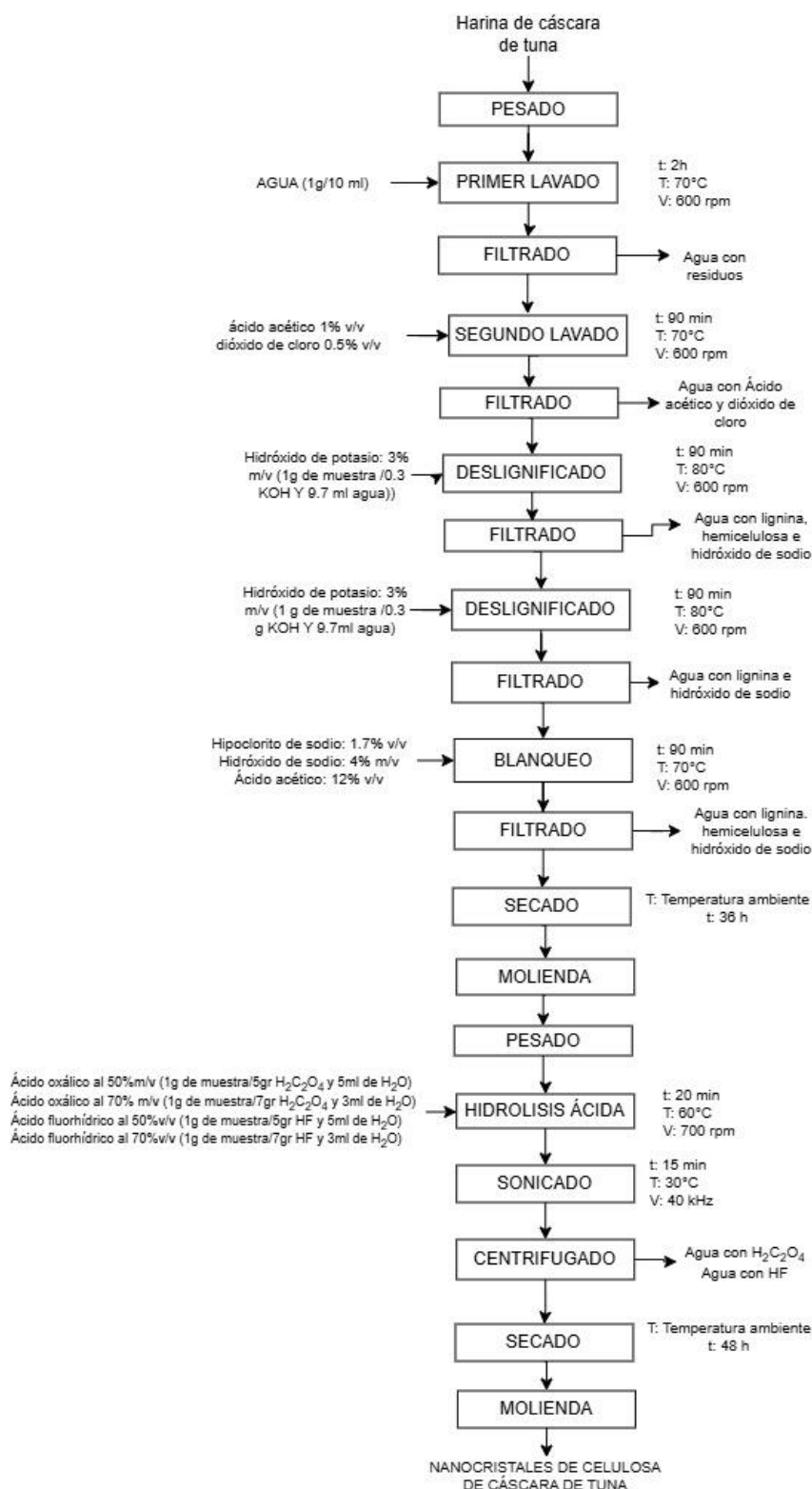


Recepción: Se recolectó 10 kg de la materia prima, para luego extraer todo aquel residuo que sea diferente a la cáscara de tuna. En esta etapa se tiene 10000 g en peso de entrada. **Lavado:** Se realizó el lavado utilizando agua donde salen residuos como la tierra o polvo y que la materia prima esté en condiciones aceptables. **Secado:** Se realizó el secado a temperatura ambiente exponiéndolo directamente al sol por un periodo de 30 días. En esta etapa se tiene una salida 1980 g en peso con una pérdida de 8020 g. **Molienda y Tamizado:** Se utilizó el tamizador después de la molienda por un periodo de tiempo de 2 minutos donde se pasa por el tamiz 120 y tamiz 230. Se seleccionó la harina de cáscara de tuna del tamiz 230 donde la granulometría es de 0.063 mm. En esta etapa se tiene 1980 g en peso de entrada del tamiz 230 de 480 g y una segunda salida de los otros 3 tamices de 1220 g con pérdida que no pasó por el tamiz de 280 g.

4.5.4 Obtención de Nanocrisales de Celulosa de Cáscara de Tuna (*Opuntia ficus-indica*)

Figura 6

Diagrama de Flujo de la Obtención de Nanocrisales de Celulosa



Pesado: Se ha utilizado 160 g de harina de cáscara de tuna en total para los 4 tratamientos, debido a que el rendimiento de obtención de nanocristales de celulosa es más del 60% de acuerdo a estudios realizados en otras materias primas, la cantidad de nanocristales obtenidos es suficiente para realizar las pruebas. **Primer lavado:** Para realizar el primer lavado se consideró la metodología propuesta por (Benhamou et al., 2021), al cual se le hicieron modificaciones como se detallan a continuación: Se pesó 40 g de muestra para cada tratamiento, la harina de cáscara de tuna fue tratada con 400 mL de agua destilada por cada tratamiento, la proporción de muestra y agua fue de (1 g/10 mL), el tratamiento fue realizado en un agitador magnético a 70°C, 600 rpm por 2 horas. En esta etapa se tiene 440 g en peso de entrada total. **Filtrado:** En esta etapa se realizó el filtro utilizando una tela de organza y vasos precipitados con capacidad de 1000 mL. En esta etapa se tiene una salida de sólido de 35.47 g, salida líquida 404.53 g en peso con una pérdida de 4.53 g. **Segundo lavado:** Después del filtrado, se realiza el segundo lavado donde se preparó una solución de ácido acético y dióxido de cloro, para 35.47 g de muestra se añadió 1300 mL de agua se le agrego 26 mL de dióxido de cloro y 13 mL de ácido acético, este tratamiento se realizó en agitador magnético a 60 °C , 600 rpm y 90 min. En esta etapa se tiene 1374.47 g en peso de entrada total. **Filtrado:** En esta etapa se realizó el filtrado utilizando una tela de organza y vasos precipitados con capacidad de 1000 mL. Luego se lavó hasta que la muestra alcance un pH de 6 a 7. En esta etapa se tiene una salida de sólido de 27.85 g, salida líquida 1346.62 g en peso con una pérdida de 7.62 g. **Deslignificado:** Para realizar el tratamiento alcalino la muestra es de 27.85 g y se preparó una solución de hidróxido de potasio al 3% m/v, para esta solución se requiere 1426 mL de agua y 42.78 g de KOH, la solución se prepara en función del peso húmedo de la muestra lavada, este tratamiento se realizó en un agitador magnético a 70 °C , 600 rpm y 90 min. En esta etapa se tiene 1496.63 g en peso de entrada total. **Filtrado:** La muestra pasó a filtrarse y lavarse hasta aclarar el color de agua que es el residuo. En esta etapa se tiene una salida de sólido de 19.71 g, salida líquida 1476.92 g en peso con una pérdida de 8.14 g. **Blanqueo:** El blanqueamiento tiene como muestra 19.71 g y se realizó preparando una solución de hipoclorito de sodio al 1.7%, para esto se preparó una solución de 835 mL de agua y 14.195 mL de hipoclorito de sodio, también se preparó 835 mL de solución tampón (hidróxido de sodio 4% m/v y ácido acético al 12 % v/v) el tratamiento se realizó en un agitador magnético a 70 °C, 600 rpm y 90 min. En esta etapa se tiene 1703.91 g en peso de entrada total. **Filtrado:** Después se realizó el filtrado y el lavado con agua hasta lograr obtener un pH de 6 a 7. En esta etapa se tiene una salida de sólido de 9.20 g, salida

líquida/vapor 1694.71 g en peso con una pérdida de 10.51 g. **Secado:** La muestra blanqueada pasa por un proceso de secado a temperatura ambiente, por un periodo de tiempo de 36 horas. **Molienda:** Las muestras deslignificadas y blanqueadas pasan a ser molidas y tiene un peso de 9.20 g, para poder realizar el tratamiento de la hidrólisis ácida. **Pesado:** En esta etapa se pesa la muestra obtenida hasta ese momento que es de 9.20 g para cada tratamiento y se pesó para conocer el rendimiento antes y después de la hidrólisis ácida. **Hidrólisis ácida:** La hidrólisis a la muestra tratada se realizó variando la concentración de ácido fluorhídrico y el ácido oxálico, el tratamiento se realizó en un agitador magnético a 60 °C, 700 rpm y 20 min. Por cada gramo de celulosa de cáscara de tuna en base seca, se empleó 10 mL de solución. En esta etapa se tiene 101.20 g en peso de entrada total. **Sonicado:** A continuación se realizó la asistencia por sonicación colocando las muestras en un medio acuoso dentro del sonicador a 30°C, a 15 min con vibraciones de 40 kHz. **Centrifugado:** Seguidamente se lavó las muestras con agua fría hasta alcanzar el pH de 6 a 7, Las suspensiones se centrifugaron durante 10 minutos a 2000 rpm para eliminar el sobrenadante, este procedimiento se realizó 2 veces. **Secado:** Se realiza el filtrado y seguidamente el secado a temperatura ambiente por 48 horas. En esta etapa se tiene una salida de sólido de 5.32 g, 6.67 g, 4.38 g, 6.30 g; salida líquida 95.89 g, 94.53 g, 96.82 g, 94.90 g en peso con una pérdida de 3.89 g, 2.53 g, 4.82 g, 2.90 g. **Molienda:** Se realizó la molienda para poder hacer los análisis correspondientes. Seguidamente se obtiene nanocristales de celulosa con peso 5.32 g, 6.67 g, 4.38 g, 6.30 g de acuerdo a como los autores indican en sus procedimientos el cual se adecuó en relación a nuestra materia prima.

4.5.4.1. Cálculo del Rendimiento

Para la determinación del rendimiento mediante la fórmula de Fernández Herrera (2021) de los nanocristales de celulosa obtenida a partir de la cáscara de tuna, se realizó mediante la ecuación, en el proceso antes de la hidrólisis ácida con un peso de 9.20 g y después de la hidrólisis ácida con un peso de 5.32 g, 6.67 g, 4.38 g, 6.30 g.

$$\%Rendimiento = \frac{Peso\ del\ producto\ final}{Peso\ del\ producto\ inicial} \times 100$$

4.5.4.2. Análisis del Color

Para la determinación del color de los nanocristales de celulosa obtenida a partir de cáscara de tuna, se realizó utilizando el método de CIELab por el software Color Meter App. Se utilizó 2

g de muestra en un caja acondicionada para evitar la luz exterior lo cual se encuentra en las fotografías de los anexos.

Estas fórmulas utilizan las coordenadas cartesianas (a) (eje rojo/verde) y (b) (eje amarillo/azul) para calcular las coordenadas polares (C) y (h) (Tadahiro Azetsu & Noriaki Suetake, 2021).

Formula del Croma

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Formula de la Tonalidad

$$H = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

4.5.4.3. Análisis de la Morfología de los Nanocristales de Celulosa (SEM)

Para la determinación del tamaño de la partícula de los nanocristales de celulosa obtenida a partir de cáscara de tuna, se realiza mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM). Un equipo integrado con microscopio Scios 2 DualBeam FIB-SEM y programa externo Kalliope de Anton Paar. Se utilizó 1 g de muestra. Para el montaje de la muestra, se colocó en un soporte, donde se dispersó los nanocristales de celulosa sobre un stub metálico con cinta de carbono y que esté libre de humedad; posteriormente se realizó el recubrimiento conductor para evitar la carga eléctrica de la muestra, donde se recubrió con una capa fina de oro mediante Sputtering con un espesor de 5 nm; en la configuración del microscopio Scios 2 DualBeam FIB-SEM, se ajustó el voltaje a 5 kV con los electrones secundarios para la morfología. Mediante el programa externo Kalliope de Anton Paar se obtuvieron las micrografías para la captura de imágenes a diferentes aumentos y su medición de longitud de los nanocristales de celulosa (Thermo Fisher Scientific, 2020; Anton Paar GmbH, 2021).

4.5.4.4. Determinación de los Grupos Funcionales (FTIR)

Para la determinación de los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa obtenida a partir de cáscara de tuna, se realizó mediante el análisis de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR). El espectrómetro Bruker IFS66v se usó para medidas en el infrarrojo lejano ($550\text{--}20\text{ cm}^{-1}$) y medio ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) en modos de transmisión y reflectancia y software OMNIC. Se utilizó 1 g de muestra. Se colocó la muestra en el accesorio adecuado, se usó una pastilla de KBr, se aseguró el contacto uniforme entre la muestra y el cristal, se colocó la muestra en el espectrómetro Bruker IFS66v, seguidamente se realizó la configuración del

espectrómetro, con un rango típico 4000-20 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} , con 32 barridos para la reducción de ruido. Mediante el software OMNIC se realizó el registro del espectro, se verificó su estabilidad para guardar el espectro en formato digital, para finalmente analizar las bandas características y los enlaces de la celulosa (Bruker Optics GmbH, 2019; Thermo Fisher Scientific, 2021).

4.6. Diseño Experimental

El diseño experimental corresponde a un diseño bifactorial, que son las variables independientes (tipo de ácido con dos niveles) y la otra variable independiente (concentración de ácido que son dos concentraciones), con ellos se construye el arreglo bifactorial, con un total de 4 tratamientos. Se tuvo tres repeticiones para el arreglo factorial, por lo tanto, el número total de corridas experimentales es de 12 unidades experimentales. Usando el programa Statgraphics Centurion XVI se realizó el ANOVA bifactorial para el efecto principal del tipo de ácido y su concentración utilizada, así mismo la interacción de ambos factores (Pérez López, 2022).

Tipo de ácido

- Nivel 1: Ácido Oxálico
- Nivel 2: Ácido fluorhídrico

Concentración de ácido

- Nivel 1: 50%
- Nivel 2: 70%

Tabla 5

Diseño Experimental Factorial

		Concentración de ácido	
		50%	70%
Tipo de ácido	Ácido oxálico	AO50	AO70
	Ácido fluorhídrico	AF50	AF70

Nota: La tabla se muestra en base a las variables independientes.

4.6.1

Modelo Estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

$i = 1, \dots, a$ $j = 1, \dots, b$ $k = 1, \dots, n$ donde:

μ es el efecto medio global

α_i es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel i del factor A

β_j el efecto incremental sobre la media causado por el nivel j del factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$ el efecto incremental sobre la media causado por la interacción del nivel i del factor A y el nivel j del factor B.

ε_{ijk} el término de error

4.6.2 Matriz Experimental

Tabla 6

Propiedad Física de Color de Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna

Tratamiento	Independiente		Dependiente		
	Tipo de ácido	Concentración de ácido	Luminosidad L*	Coordenada a*	Coordenada b*
T1	AO	50	LAO50	aAO50	bAO50
T2	AO	70	LAO70	aAO70	bAO70
T3	AF	50	LAF50	aAF50	bAF50
T4	AF	70	LAF70	aAF70	bAF70

Nota: En esta tabla se muestra la propiedad física de las variables independientes de tipo de ácido y concentración de ácido con relación de la variable dependiente del color en el espacio CIELab.

Tabla 7

Rendimiento de Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna

Tratamiento	Independiente		Dependiente
	Tipo de ácido	Concentración de ácido	Rendimiento (%)
T1	AO	50	AO50
T2	AO	70	AO70
T3	AF	50	AF50
T4	AF	70	AF70

Nota: La tabla muestra la propiedad física de las variables independientes de tipo de ácido y concentración de ácido con relación de la variable dependiente Rendimiento.

4.6.3 Técnicas para Demostrar la Veracidad o Falsedad de las Hipótesis

Hipótesis estadística

La prueba de hipótesis:

H_0 : Hipótesis nula

H_A : Hipótesis alterna

Donde:

X: Tipo de ácido

Y: Concentración de ácido

Tipo de Ácido

H_0 : Efecto $X=0$; El tipo de ácido no influye en el rendimiento

H_A : Efecto $X \neq 0$; El tipo de ácido influye en el rendimiento

H_0 : Efecto $X=0$; El tipo de ácido no influye en la luminosidad

H_A : Efecto $X \neq 0$; El tipo de ácido influye en la luminosidad

H_0 : Efecto $X=0$; El tipo de ácido no influye en el croma

H_A : Efecto $X \neq 0$; El tipo de ácido influye en el croma

H_0 : Efecto $X=0$; El tipo de ácido no influye en la tonalidad

H_A : Efecto $X \neq 0$; El tipo de ácido influye en la tonalidad

Concentración de Ácido

H_0 : Efecto $Y=0$; La concentración de ácido no influye en el rendimiento

H_A : Efecto $Y \neq 0$; La concentración de ácido influye en el rendimiento

H_0 : Efecto $Y=0$; La concentración de ácido no influye en la luminosidad

H_A : Efecto $Y \neq 0$; La concentración de ácido influye en la luminosidad

H_0 : Efecto $Y=0$; La concentración de ácido no influye en el croma

H_A : Efecto $Y \neq 0$; La concentración de ácido influye en el croma

H_0 : Efecto $Y=0$; La concentración de ácido no influye en la tonalidad

H_A : Efecto $Y \neq 0$; La concentración de ácido influye en la tonalidad

Interacción Tipo de Ácido x Concentración de Ácido

H_0 : Efecto $XY=0$; El tipo de ácido x concentración de ácido no influye en el rendimiento

H_A : Efecto $XY \neq 0$; El tipo de ácido x concentración de ácido influye en el rendimiento

H_0 : Efecto $XY=0$; El tipo de ácido x concentración de ácido no influye en la luminosidad

H_A : Efecto $XY \neq 0$; El tipo de ácido x concentración de ácido influye en la luminosidad

H_0 : Efecto $XY=0$; El tipo de ácido x concentración de ácido no influye en el croma

H_A : Efecto $XY \neq 0$; El tipo de ácido x concentración de ácido influye en el croma

H_0 : Efecto $XY=0$; El tipo de ácido x concentración de ácido no influye en la tonalidad

H_A : Efecto $XY \neq 0$; El tipo de ácido x concentración de ácido influye en la tonalidad

Nivel de Significancia al 5 %

Si p es menor a 0.05; se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Si p es mayor a 0.05; se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Rendimiento

En la tabla N°8 se observan los datos obtenidos de los porcentajes de rendimiento para T1(AO/50%), T2(AO/70%), T3(AF/50%), T4(AF/70%) con tres repeticiones para cada tratamiento. Se realizó el pesado de la muestra antes de la hidrólisis ácida y también el peso de las muestras después de la hidrólisis ácida y su asistencia por sonicación para el cálculo del rendimiento de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.

Tabla 8

Rendimiento para los Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna

Tratamiento	Tipo de ácido	Concentración de ácido (%)	Rendimiento (%)
T1	AO	50	57.54
	AO	50	57.87
	AO	50	57.93
Media			57.78±0.306
T2	AO	70	72.42
	AO	70	72.78
	AO	70	72.19
Media			72.46±0.298
T3	AF	50	47.37
	AF	50	47.84
	AF	50	47.52
Media			47.58±0.240
T4	AF	70	68.47
	AF	70	68.82
	AF	70	68.21
Media			68.50±0.308

Nota: Elaboración propia

En la tabla 8 se presentan las comparaciones múltiples del rendimiento de nanocristales de celulosa extraídas de la cáscara de tuna por hidrólisis ácida, el rendimiento varía entre el rango de 47.37% a 72.78 %. Los tratamientos T1(AO/50%), T3(AF/50%) Y T4(AF/70%) son los que obtuvieron menores porcentajes de rendimiento.

El porcentaje de rendimiento de los nanocristales de celulosa extraída de cáscara de tuna se determinó utilizando la ecuación mencionada por el autor Canada Beef (2022), el cual varía de entre 47.37% a 72.78%, por la concentración y tipo de ácido utilizado. Los valores obtenidos en la prueba son más altos que el trabajo de investigación realizado por Coelho et al., (2018) con 27,56% de rendimiento para las muestras obtenidas por hidrólisis ácida por un tiempo de 30 min

y 20,96% de rendimiento para muestras obtenidas por hidrólisis ácida y 60 minutos como tiempo de reacción de hidrólisis.

Según el autor (Flauzino Neto et al., 2013) obtuvo nanocristales de celulosa de fibra de hojas de piña en el que utilizó el método de hidrólisis ácida por tiempos de reacción de 5, 30 y 60 minutos, las muestras pasaron por sonicación por un tiempo de 10 minutos, los rendimientos de hidrólisis ácida, con respecto a la cantidad inicial de fibra fueron de 77, 65 y 55% en peso, el rendimiento de los nanocristales depende del tiempo de reacción, estos resultados están dentro del parámetro del porcentaje de rendimiento obtenidos en la muestra, se utilizó el mismo método (hidrólisis ácida asistida por sonicación), en ambas pruebas se utilizaron diferentes tiempos de reacción y diferente concentración de ácido.

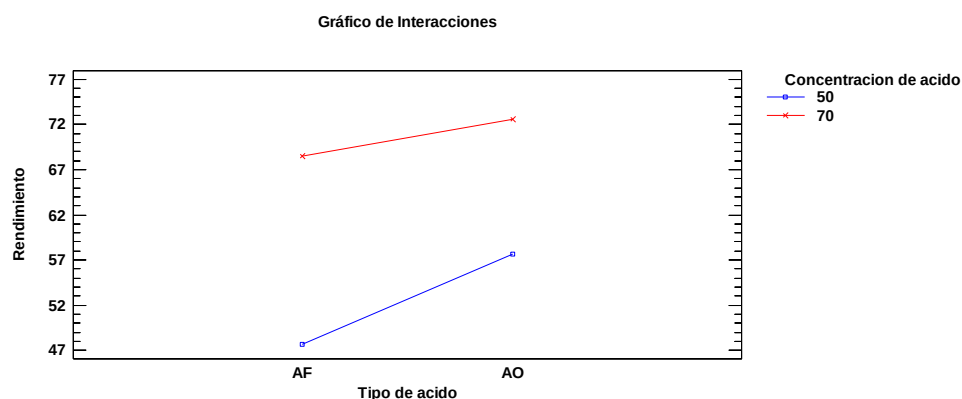
Tabla 9

Análisis de Varianza para el Rendimiento

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón – F	Valor – P
X:Tipo de ácido	146.301	1	146.301	1758.07	0.0001
Y:Concentración de ácido	961.588	1	961.588	11555.23	0.0001
XY	27.361	1	27.361	328.79	0.0001
Restantes	0.666	8	0.083		
Total arreglado	1135.916	11			

Nota: Tabla obtenida del programa statgraphics con los datos de rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la tabla 9 se tiene los resultados obtenidos por el programa, se observa que la variable de tipo de ácido (X), concentración de ácido (Y) e interacción (XY) sí hubo efecto principal debido a que el valor de p es menor a 0.05. Por tal motivo decimos que el análisis de varianza para el rendimiento de los nanocristales de celulosa en tipo de ácido (X), concentración de ácido (Y) e interacción (XY) sí influyen significativamente al 5% y poseen efecto sobre la variable de respuesta, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Figura 7*Gráfica de Interacciones para el Rendimiento*

Nota: Figura obtenida del programa statgraphics con los datos de rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En los resultados obtenidos se tiene una tendencia general para el tipo de ácido y concentración del 50 y 70% produciendo un incremento significativo sobre el rendimiento del tratamiento ácido. Para el efecto de interacción las dos líneas no son idénticamente paralelas, la pendiente para el ácido fluorhídrico (HF) es ligeramente mayor a diferencia del ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$). Este ligero paralelismo es el motivo de que la interacción sea estadísticamente significativa (p mayor a 0.0001) en el ANOVA.

5.2. Color

Al realizar la medición del color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna se obtuvieron los resultados de las coordenadas L^* , a^* y b^* , así como se muestra en la tabla N° 10, obteniendo para la coordenada L^* en las 3 repeticiones valores entre 49 a 55, para la coordenada a^* en las 3 repeticiones valores de 1 a 3 y para la coordenada b^* en las 3 repeticiones entre 18 a 28; así mismo se halló los resultados para el croma entre 18.03 a 28.16 y para la tonalidad entre 81.47° a 86.82° en comparación con los resultados del autor Manzanarez et. al (2022) donde obtuvo los resultados para la coordenada L^* es de 42, para la coordenada a^* es -5 y para la coordenada b^* es 22, así mismo para el croma es de 14 y la tonalidad es de 104° , se puede observar que existe diferencia entre la coordenada L^* , así mismo la diferencia significativa entre la coordenada a^* y b^* , se debe a que existe el uso de diferentes ácidos al momento de realizar los

tratamientos y pueda significar la diferencia en la luminosidad así mismo como pueda que afecte la metodología utilizada para realizar el análisis del color.

Tabla 10

Medición de Color de los Nanocristales de Celulosa de Cáscara de Tuna

	Identificación	L*	a*	b*	C*	h°
T1	AOC5	52	2	20	20.10	84.29°
	AOC5	49	2	23	23.09	85.03°
	AOC5	54	2	22	22.09	84.81°
Media		51.67±2.52	2.00±0.00	21.67±1.53	21.76±1.52	84.71±0.38°
T2	AOC7	51	1	18	18.03	86.82°
	AOC7	53	2	18	18.11	83.66°
	AOC7	54	2	19	19.10	83.99°
Media		52.67±1.53	1.67±0.58	18.33±0.58	18.41±0.60	84.82±1.74°
T3	AFC5	53	3	26	26.17	83.42°
	AFC5	55	2	28	28.07	85.91°
	AFC5	54	3	28	28.16	83.88°
Media		54.00±1.00	2.67±0.58	27.33±1.15	27.47±1.12	84.41±1.33°
T4	AFC7	55	3	22	22.20	82.23°
	AFC7	54	2	21	21.10	84.56°
	AFC7	52	3	20	20.22	81.47°
Media		53.67±1.53	2.67±0.58	21.00±1.00	21.17±0.99	82.75±1.61°

Nota: Elaboración propia

(Coelho et al., 2018) en su trabajo de investigación determinó la luminosidad de los nanocristales de orujo de uva después de realizar dos blanqueados, la L, croma y tonalidad que determinó en el primer blanqueado L es 76.69, Croma es de 20.89, tonalidad es de 80.85 grados, también indica que después de realizar el blanqueamiento la muestra obtiene mayor luminosidad. En los tratamientos T1,T2,T3 y T4 se obtuvieron valores cercanos a los que obtuvo el autor, esto debido a que se ha utilizado diferentes parámetros en el proceso de blanqueamiento y diferentes tipos de materia prima.

En conjunto, los resultados indican que la luminosidad (L*) y el ángulo de tonalidad (h°) de la nanocelulosa de cáscara de tuna no se vieron afectados de forma estadísticamente significativa por el tipo ni la concentración del ácido empleado en la hidrólisis, mientras que el croma (C*) sí mostró diferencias significativas para al menos los efectos principales. El ácido fluorhídrico (HF) generó nanocristales de celulosa con mayor intensidad de color amarillo (b*, C*) y ligeramente más rojiza (a*) que el ácido oxálico (H₂C₂O₄), y en ambos ácidos el incremento de la concentración de 50 % a 70 % redujo la intensidad del color (b*, C*). Estos hallazgos son consistentes con la literatura sobre blanqueamiento de materiales celulósicos, donde condiciones

de hidrólisis más intensas favorecen la remoción de cromóforos residuales sin alterar sustancialmente el matiz del material.

Tabla 11

Análisis de Varianza para la Luminosidad

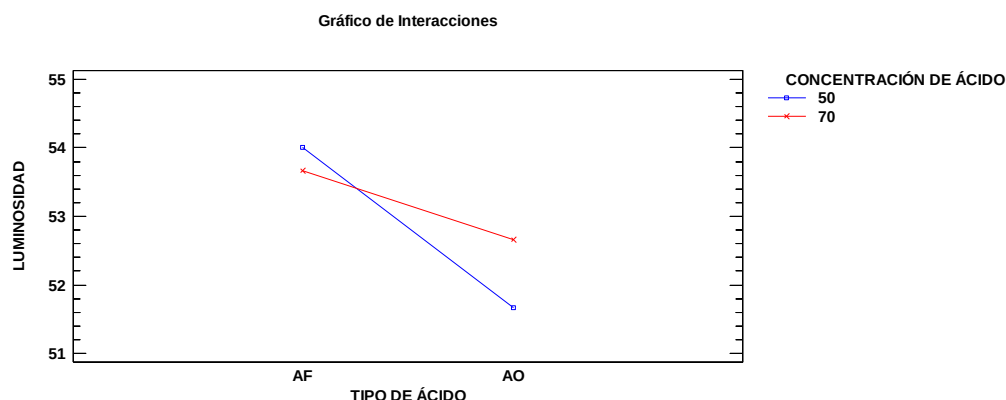
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón – F	Valor – P
X:Tipo de ácido	8.333	1	8.333	2.778	0.1341
Y:Concentración de ácido	0.333	1	0.333	0.111	0.7475
XY	1.333	1	1.333	0.444	0.5237
Restantes	24.000	8	3.000		
Total arreglado	34.000	11			

Nota: Tabla obtenida del programa statgraphics con los datos de luminosidad de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la tabla N° 11 la ausencia de efecto principal para el tipo de ácido con un $p=0.1341$ superior a 0.05, la elegibilidad en el uso de ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) y el ácido fluorhídrico (HF) no genera diferencia estadística significativa sobre la luminosidad de los nanocristales de celulosa, así mismo el efecto de la concentración de ácido con $p=0.7475$ que varía de 50 a 70% tampoco altera de manera significativa en la luminosidad de los nanocristales de celulosa; en la interacción con un valor de $p=0.5237$ superior a 0.05 indica que no existe interacción estadística significativa entre el tipo de ácido y su concentración. Ninguno de los factores evaluados (tipo de ácido y concentración de ácido), ni su combinación binaria, ejercen un efecto significativo sobre la Luminosidad al 95.0% de confianza ($p > 0.05$). En consecuencia, la luminosidad de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna se mantiene estable e independiente de la naturaleza del ácido o de su fuerza química en los intervalos probados.

Figura 8

Gráfica de Interacciones para la Luminosidad



Nota: Figura obtenida del programa statgraphics con los datos de luminosidad de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

El cruce de líneas no es significativo porque aunque las rectas de las concentraciones visualmente se cruzan en la figura N°8, este cruce ocurre a una escala de variabilidad sumamente pequeña, como se determinó en la tabla de ANOVA, la interacción de tipo de ácido y su concentración no es significativo. En el uso del ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) al aumentar la concentración del 50% al 70% , la luminosidad promedio aumenta ligeramente, por el contrario, con el uso del ácido fluorhídrico (HF) al aumentar la concentración del 50% al 70%, la luminosidad disminuye ligeramente. El cruce visual que se observa en la figura N°8 no representa un efecto real o estadístico significativo sobre la variabilidad de la experimentación. Se concluye que el efecto del tipo de ácido y su concentración sobre la luminosidad es el mismo sin importar la interacción.

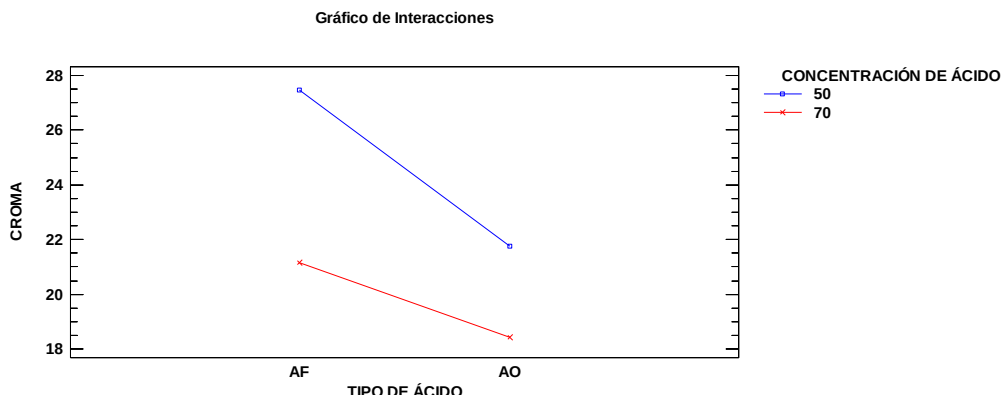
Tabla 12

Análisis de Varianza para el Croma

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón – F	Valor – P
X:Tipo de ácido	53.763	1	53.763	43.718	0.0002
Y:Concentración de ácido	69.697	1	69.697	56.675	0.0001
XY	6.512	1	6.512	5.295	0.0504
Restantes	9.838	8	1.230		
Total arreglado	139.811	11			

Nota: Tabla obtenida del programa statgraphics con los datos de croma de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la tabla N°12 el efecto principal es altamente significativo tanto para el tipo de ácido así como la concentración de ácido, ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la saturación de color. El valor $p=0.0504$ se encuentra prácticamente en el umbral crítico de 0.05, lo cual refleja una tendencia visual en la figura N°9 donde al incrementar la concentración de ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) y ácido fluorhídrico (HF) las pendientes disminuyen ligeramente, este valor de interacción se sitúa en el límite de significancia estadística con 95% de confianza. A diferencia de la luminosidad, el croma o saturación de color sí se ve severamente afectado por las condiciones del tipo de ácido y su concentración, al cambiar el tipo de ácido o incrementar la concentración de ácido, esto reduce la intensidad de color de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.

Figura 9*Gráfica de Interacciones para el Croma*

Nota: Figura obtenida del programa statgraphics con los datos de croma de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°9 el comportamiento visual sobre el tipo de ácido, al cambiar de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) a ácido fluorhídrico (HF), la saturación de color cae significativamente para ambos, en la concentración de ácido al subir del 50% al 70% se reduce drásticamente el croma, la línea azul de concentración al 50% se encuentra sobre la línea roja del 70%. La línea de la concentración de ácido al 50% se visualiza una pendiente descendente pronunciada y para la línea de concentración de ácido al 70% se visualiza también la pendiente de forma descendente, pero ligeramente suave. Existe la falta de paralelismo y la mayor inclinación de la línea de concentración de ácido al 50% nos indica que el croma es mucho más sensible con el uso de diferentes ácidos a bajas concentraciones. Para obtener una mejor saturación de color se debe de utilizar el ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) al 70%, en cambio, para la mayor intensidad cromática se logra con ácido fluorhídrico (HF) al 50%.

Tabla 13

Análisis de Varianza para la Tonalidad

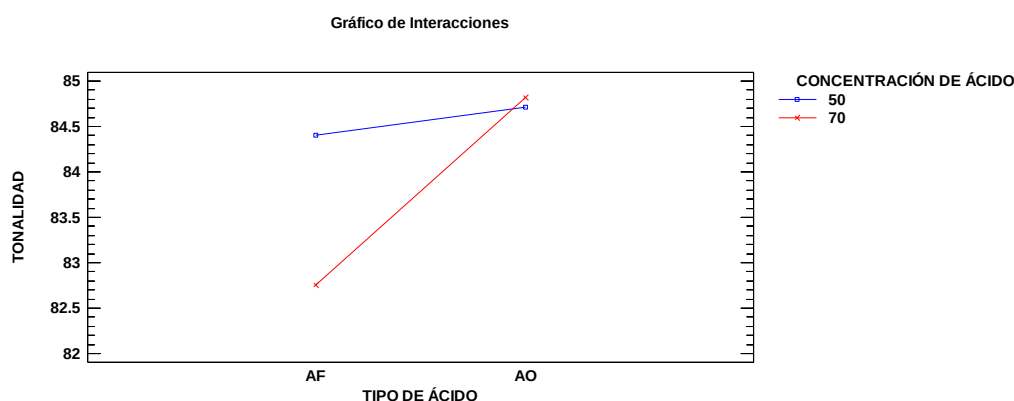
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón – F	Valor – P
X:Tipo de ácido	4.236	1	4.236	2.257	0.1715
Y:Concentración de ácido	1.771	1	1.771	0.943	0.3599
XY	2.332	1	2.332	1.242	0.2974
Restantes	15.019	8	1.877		
Total arreglado	23.358	11			

Nota: Tabla obtenida del programa statgraphics con los datos de tonalidad de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la tabla N°13 la ausencia de efecto principal para el tipo de ácido no genera variaciones estadísticamente significativas en el uso de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y ácido fluorhídrico (HF) para el matiz de color, para la concentración de ácido tampoco influye significativamente en el matiz de color sin depender de si es 50% o 70%. En la interacción de tipo de ácido y su concentración con el valor de $p=0.2974$, valor que está por encima del umbral de significancia de 0.05, nos indica que el efecto de la concentración de ácido sobre el matiz de color no depende del tipo de ácido que se utiliza. Al visualizarse el valor de p superior a 0.05, donde el tipo de ácido, su concentración y su interacción no alteran significativamente sobre el matiz de color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna, identificando que el matiz de color es intrínseco y permanece estable frente a las variaciones después de los pre tratamientos e hidrólisis ácida.

Figura 10

Gráfica de Interacciones para la Tonalidad



Nota: Figura obtenida del programa statgraphics con los datos de la tonalidad de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°10 en el comportamiento visual para el uso de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) muestra que las concentraciones de 50% y 70% convergen prácticamente en el mismo punto, registrando una tonalidad promedio más elevada, en el uso de ácido fluorhídrico (HF) se muestra una discrepancia sobre la concentración, al usar una concentración del 50% está en un punto más alto a diferencia de usar una concentración del 70% donde su valor cae en un punto más bajo. En la tendencia de las pendientes, sobre la línea de concentración de ácido al 70% tiene una pendiente ascendente muy pronunciada, mientras que la línea de concentración de ácido al 50% presenta una inclinación casi horizontal. Aunque la convergencia visual de las líneas muestra un leve cruce en el extremo derecho dentro de la figura N°10, se muestra la convergencia sobre la concentración del ácido oxálico. A pesar de la visible pendiente de la línea de concentración de ácido al 70%, la

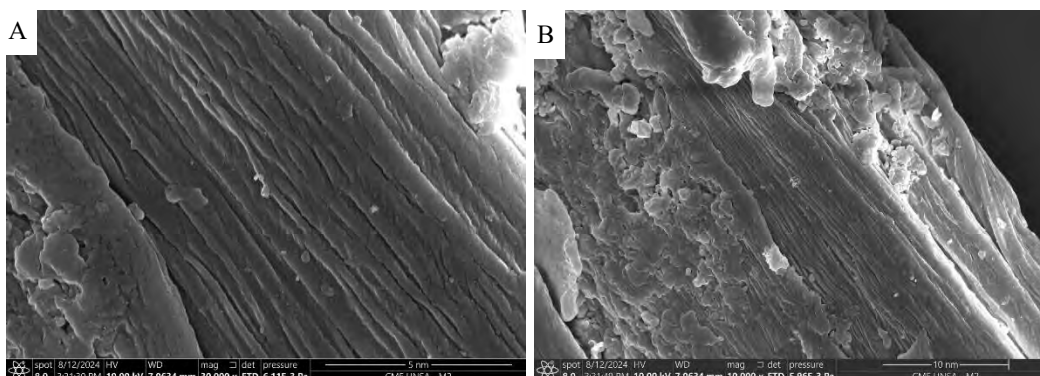
variación abarca un rango muy estrecho. Como se determinó en la tabla N°13, la pendiente marcada de concentración a 70% no alcanza significación estadística. El matiz de color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna no se ve afectado significativamente por el tipo de ácido, concentración ni su interacción, se conserva en ángulo de matiz muy estable, esto es característico del perfil cromático de la cáscara de tuna, independientemente de los pre tratamientos e hidrólisis ácida aplicada para la obtención de nanocristales de celulosa.

5.3. Estructura Morfológica (SEM)

Para conocer la estructura de los nanocristales obtenidos a partir de cáscara de tuna en los tratamientos T1(AO/50%), T2(AO/70%), T3(AF/50%), T4(AF/70%); se obtuvieron imágenes por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Figura 11

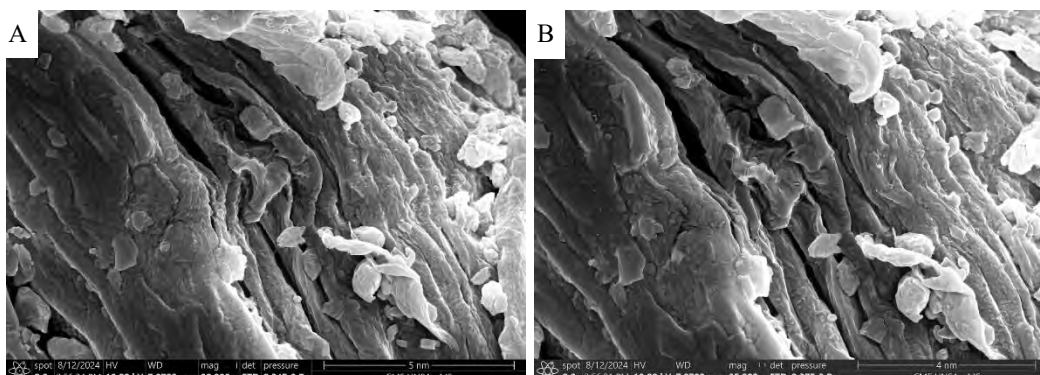
Estructura Morfológica del Tratamiento 1 T1(AO/50%)



Nota: Imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En las imágenes de la figura N°11 se observa la estructura morfológica del T1(AO/50%), con el uso de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) en concentración de 50%. En la imagen A se observa la estructura a 5 nanómetros, lo cual nos permite observar de mejor forma la estructura morfológica de los nanocristales, la figura B está a una escala de 10 nanómetros.

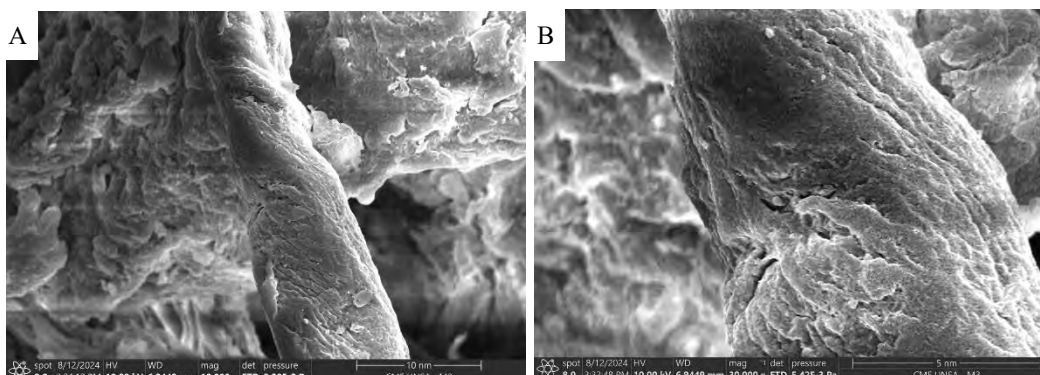
La micrografía SEM obtenida a 10 nanómetros se revela que el proceso de hidrólisis ácida produjo una eliminación significativa de la fase amorfa de la celulosa, exponiendo nanofibras con estrías longitudinales características de la región cristalina. Las zonas rugosas y fragmentadas indican una erosión ácida selectiva, relacionada con la liberación de nanocristales de celulosa (NCC). Asimismo, la presencia de pequeños agregados compactos sugiere la aglomeración de nanocristales durante el secado previo al análisis.

Figura 12*Estructura Morfológica del Tratamiento 2 T2(AO/70%)*

Nota: Imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°12, en las imágenes se observa la estructura morfológica del tratamiento 2 con ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) al 70%. La estructura de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), las muestras se han obtenido mediante hidrólisis ácida, seguido de un tratamiento de sonicación. En la imagen se observan los cambios estructurales, donde se observa una estructura menos aglomerada.

La micrografía SEM a 4 nanómetros evidencia que la muestra celulósica experimentó una erosión significativa tras la hidrólisis ácida, reflejada en la presencia de surcos profundos, deslaminación de la superficie fibrilar y desprendimiento de la matriz amorfa. Sobre esta estructura se observan agregados nanométricos compatibles con nanocristales de celulosa. Esto confirma la desintegración parcial de la fibra y la formación de dominios cristalinos pequeños y aglomerados, lo que indica que el proceso logró exponer y liberar los cristales.

Figura 13*Estructura Morfológica del Tratamiento 3 (AF/50%)*

Nota: Imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

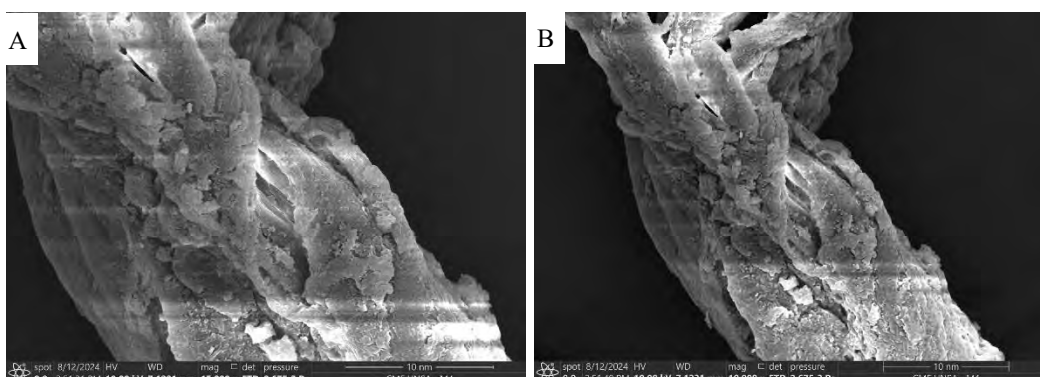
En la figura N°13 en las imágenes A y B se observa la estructura morfológica del tratamiento 3 con el uso de ácido fluorhídrico (HF) en concentración de 50%. La estructura después de los procesos químicos se observa la formación de nanocristales con una estructura sólida y en forma de varilla irregular que presenta porosidad, en la imagen A se realizó la visualización de los nanocristales a 10 nanómetros. La composición elemental presente es de mayor cantidad de carbono y oro, en cantidades mínimas se encuentra el oxígeno, calcio, aluminio y cloro.

La micrografía SEM obtenida a 5 nanómetros muestra una morfología predominantemente fibrilar, característica de materiales celulósicos parcialmente hidrolizados. En la imagen se observa una estructura alargada similar a una microfibrilla, cuya superficie presenta una textura rugosa e irregular. Este patrón es típico de la remoción de regiones amorfas durante la hidrólisis ácida, proceso a través del cual se exponen las zonas más ordenadas correspondientes a los nanocristales de celulosa (CNC).

Asimismo, la imagen evidencia una estructura compuesta por microfibras con diámetros superiores a los nanocristales individuales, lo que indica que el material analizado corresponde a una mezcla de fibrillas parcialmente despolimerizadas y nanocristales aglomerados

Figura 14

Estructura Morfológica del Tratamiento 4 (AF/70%)



Nota: Imágenes de microscopía electrónica de barrido para observar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°14, en las imágenes se observa la estructura morfológica en el tratamiento 4 con el uso de ácido fluorhídrico (HF) en concentración de 70%. La estructura pasó por tratamientos químicos para la formación de nanocristales como se observa en las imágenes A y B, una estructura sólida y aglomerada donde se presenta porosidad, se realizó la observación a un

tamaño de 10 nanómetros. En la imagen se observa una estructura trenzada o retorcida, formada por haces de microfibrillas celulósicas que conservan parte de su geometría original. La superficie general presenta rugosidad marcada, con desprendimientos laminares y zonas fracturadas, rasgo característico de la ruptura de las regiones amorfas durante la remoción parcial de hemicelulosa y lignina.

Imágenes parecidas a las que se ha obtenido reporta Coelho et al. (2018) que caracterizó la morfología de los Nanocristales de celulosa a partir de orujo de uva, se observó estructuras interconectadas. Indica que el tratamiento de ultra sonicación produjo una estructura menos aglomerada y el aplicar proceso de congelación de las suspensiones de los nanocristales de celulosa seguido de la liofilización resultó en estructuras de red interconectadas. (Collazo-Bigliardi et al., 2018) caracterizaron la morfología de celulosa microcristalina y nanocristales de celulosa de cascarilla de café y estudio comparativo con cascarilla de arroz a partir de la microscopía electrónica de barrido (SEM) se verificó que los nanocristales de celulosa tienen una estructura más ordenada con diámetros que alcanzaron tamaños micro y nanométricos a $60\ \mu m$, obtuvieron imágenes SEM desde la materia prima, de cada proceso realizado hasta la obtención de los nanocristales, para observar los cambios que se dan en la estructura.

Las imágenes de estructura morfológica obtenidas para cada tratamiento nos muestran diferencias entre los tratamientos T1, T2, T3 y T4, esto debido a que se utilizó diferentes concentraciones de ácido y diferente tipo de ácido. Se observa que las estructuras morfológicas de T1 y T2 son menos aglomeradas, lo cual indica que el proceso de hidrólisis ácida produjo una eliminación significativa de la fase amorfa de la celulosa, exponiendo microfibrillas con estrías longitudinales características de la región cristalina, pero esto no se observa en los T3 y T4, ya que presentan estructuras más aglomeradas, se observan regiones amorfas. (García et al., 2021) en su trabajo de investigación obtiene los nanocristales con estructuras aglomeradas y sin una forma regular, lo que indica que es debido al tipo de materia prima que usó, así mismo en nuestro trabajo de investigación se usa cáscara de tuna como materia prima y por lo tanto se obtuvo estructuras rígidas e irregulares.

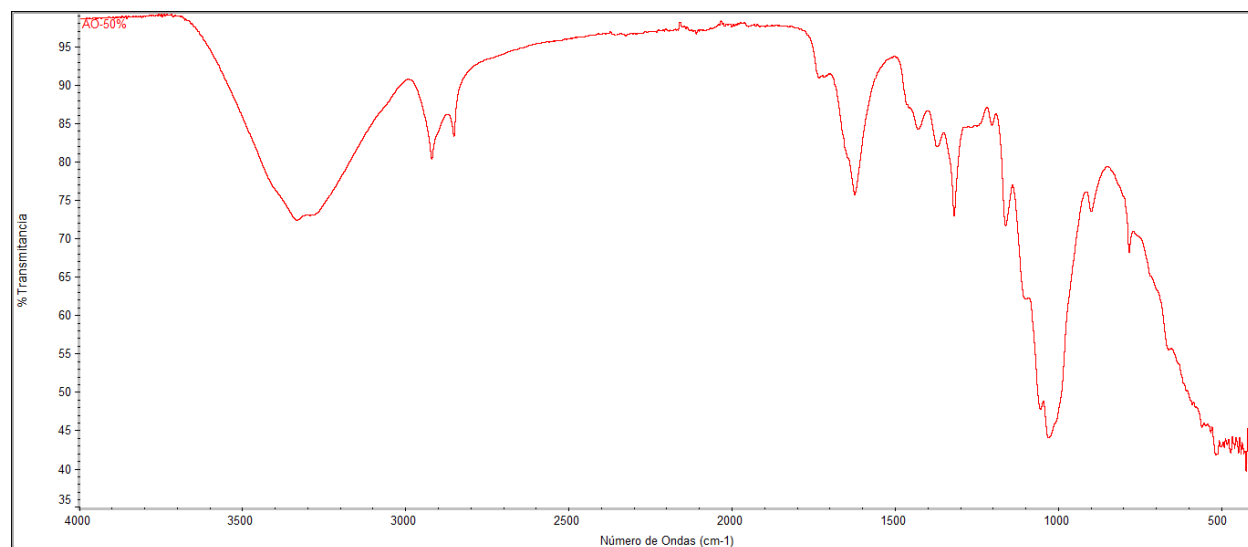
5.4. Grupos Funcionales (FTIR)

Para identificar los grupos funcionales de los nanocristales obtenidos a partir de cáscara de tuna en los tratamientos T1(AO/50%), T2(AO/70%), T3(AF/50%), T4(AF/70%); se obtuvieron

imágenes por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) las muestras se han obtenido mediante hidrólisis ácida, seguido de un tratamiento de sonicación.

Figura 15

Espectros FTIR del Tratamiento 1 (AO/50%)



Nota: Gráfica de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

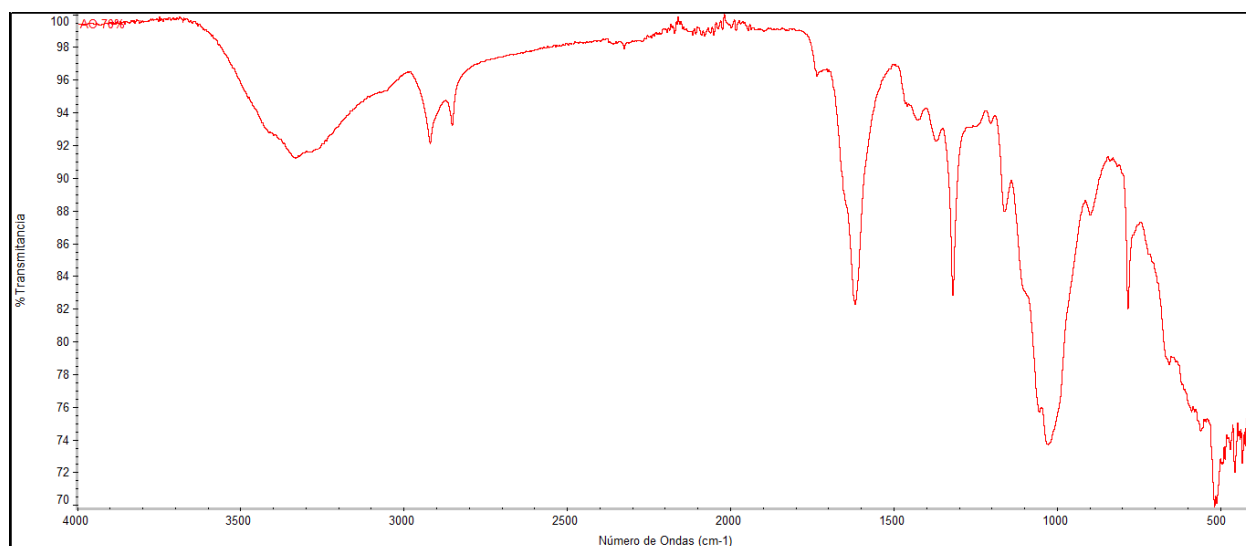
En la figura 15, en la región de $3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$, se observa una banda ancha atribuida al estiramiento O–H, correspondiente a los grupos hidroxilo presentes en la superficie de los CNC y a la formación de puentes de hidrógeno intra e intermoleculares. La forma y amplitud de esta banda son indicativas de una estructura altamente ordenada y con abundantes interacciones hidrofílicas, propias de nanocristales con elevada cristalinidad. Las señales débiles registradas entre 2950 y 2850 cm^{-1} corresponden a los estiramientos C–H de los grupos metilo y metileno presentes en la cadena glucosídica.

La banda cercana a 1640 cm^{-1} se asocia típicamente a la vibración de flexión del agua adsorbida. En los CNC, esta señal es común debido a la fuerte afinidad por el agua resultante de los grupos hidroxilo expuestos tras la hidrólisis ácida y del aumento de la superficie específica. En la región comprendida entre 1428 y 1370 cm^{-1} , se identifican señales correspondientes a las vibraciones de deformación CH_2 y C–H. La banda alrededor de 1430 cm^{-1} es especialmente relevante, ya que se considera un marcador asociado al orden cristalino de la celulosa tipo I, típico de los CNC. Entre 1160 y 1030 cm^{-1} se observan picos intensos atribuibles al estiramiento C–O–C del enlace glucosídico y a las vibraciones C–O, característicos de las unidades anhidroglucosa.

Estas bandas constituyen la huella principal de la celulosa y confirman que la hidrólisis no alteró la estructura del esqueleto glucopiranosico. La banda ubicada alrededor de 890 cm^{-1} corresponde al modo de vibración asociado al enlace β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucósido, considerado un marcador inequívoco de la celulosa nativa tipo I. En conjunto, el espectro FTIR confirma que los nanocristales obtenidos mantienen la estructura química característica de la celulosa tipo I, incluida la presencia del enlace β -(1 $\rightarrow$ 4), los grupos hidroxilo superficiales y la cristalinidad típica del material. Esto confirma que el proceso de hidrólisis ácida fue efectivo en aislar CNC sin modificar la identidad química fundamental del polímero.

Figura 16

Espectros FTIR del Tratamiento 2 (AO/70%)



Nota: Gráfica de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

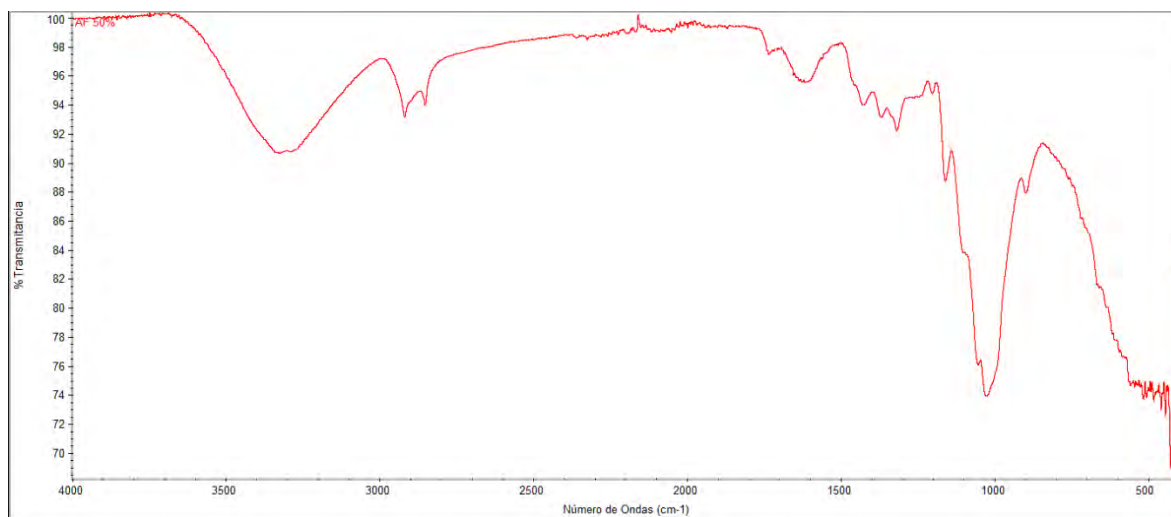
En la figura 16 se observa un pico amplio en la región de $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, correspondiente al estiramiento O–H y asociado a la red de puentes de hidrógeno propios de la celulosa de tipo I. La banda cercana a 2900 cm^{-1} se atribuye al estiramiento C–H de los grupos alifáticos presentes en la cadena glucopiranosica.

La señal alrededor de 1640 cm^{-1} está relacionada con la vibración de O–H del agua físicamente adsorbida, característica común en materiales higroscópicos. Adicionalmente, las bandas entre 1430 y 1370 cm^{-1} corresponden a la deformación del grupo CH_2 , y su presencia está asociada a la fracción cristalina del material. La banda identificada en 1160 cm^{-1} representa el estiramiento asimétrico del enlace C–O–C del anillo glucosídico, mientras que el conjunto de

señales entre 1050 y 1030 cm^{-1} corresponde a las vibraciones C–O de grupos alcohol primario y secundario. La banda situada alrededor de 890 cm^{-1} confirma la presencia del modo vibracional característico del enlace β -1,4-glucósido.

Figura 17

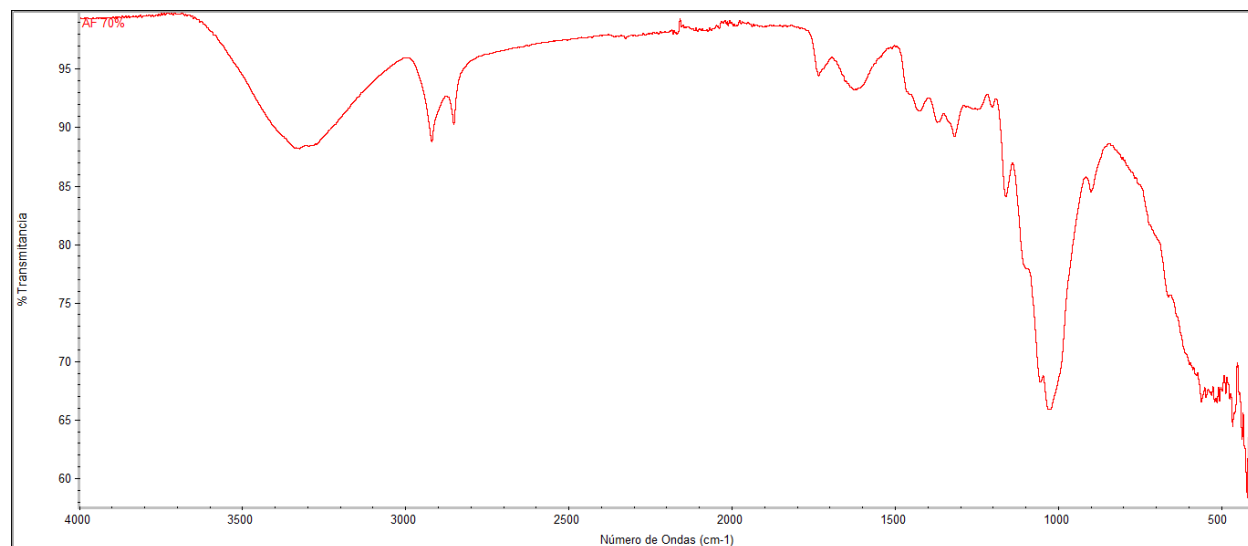
Espectros FTIR del Tratamiento 3 (AF/50%)



Nota: Gráfica de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°17 se observan bandas características de la estructura polisacárido de la celulosa. Se identificó un pico amplio en la región de 3300–3400 cm^{-1} correspondiente al estiramiento O–H, atribuible a los puentes de hidrógeno intramoleculares propios de la celulosa. La señal cercana a 2900 cm^{-1} se relaciona con el estiramiento C–H de los grupos metileno y metino presentes en la cadena glucosídica.

Asimismo, se observó una banda alrededor de 1640 cm^{-1} asociada al estiramiento O–H del agua físicamente adsorbida, lo cual es común en materiales higroscópicos como la celulosa. Las bandas situadas entre 1430 y 1370 cm^{-1} corresponden a la deformación de CH₂ y se relacionan con la región cristalina del material. Por otra parte, la señal a 1160 cm^{-1} se atribuye al estiramiento asimétrico del enlace C–O–C del anillo glucopiranosico, mientras que las bandas entre 1050 y 1030 cm^{-1} representan las vibraciones C–O de grupos alcohol primario y secundario. La banda situada alrededor de 890 cm^{-1} confirma la presencia del modo vibracional característico del enlace β -1,4-glucósido.

Figura 18*Espectros FTIR del Tratamiento 4 (AF/70%)*

Nota: Gráfica de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.

En la figura N°18 la región de $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, se observó una banda ancha centrada en $3340\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, asociada al estiramiento de los grupos O–H y atribuida a los puentes de hidrógeno característicos de la celulosa. Asimismo, el pico ubicado alrededor de 2900 cm^{-1} corresponde al estiramiento de los enlaces C–H propios de la estructura glucopiránósica. Los picos identificados en 1430 y 1370 cm^{-1} corresponden a la deformación CH_2 y C–H, respectivamente, ambos característicos de la celulosa tipo I. Los picos intensos en 1160 , 1110 y $1058\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$ se asignan a vibraciones C–O–C y C–O del enlace $\beta\text{-}1,4$ glucosídico y del esqueleto celulósico. Finalmente, la señal en 895 cm^{-1} confirma la presencia del enlace $\beta\text{-}1,4$, considerado el principal indicador de nanocristales de celulosa.

En el FTIR para cada tratamiento se observa que hay espectros similares, en los cuatro tratamientos se observaron bandas entre $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ asociada al estiramiento de los grupos O–H y en los cuatro tratamientos está presente el pico dentro de la región $880\text{--}890\text{ cm}^{-1}$. Resultados similares fueron obtenidos por Riva Reyes (2013), en su evaluación de NCC encontró picos de los grupos O–H y los enlaces de hidrógeno, bandas en 1.304 , 1.158 , 1.052 , y 1.026 cm^{-1} corresponden a enlaces C–C, un estiramiento en el puente del enlace glucosídico de la celulosa (C–O–C) y a los estiramientos C–O.

VI. CONCLUSIONES

1. El tratamiento 2 al usar ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) con una concentración del 70 %, nos presentó el mayor rendimiento de 72.46% equivalente a 6.67 g de nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna, seguido del tratamiento 4 al usar ácido fluorhídrico (HF) con una concentración del 70 %, se tiene el rendimiento del 68.50 % equivalente a 6.30 g de nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna. Esto permite establecer al tratamiento 2 como la condición experimental más eficiente para maximizar la recuperación de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.
2. El color en los tratamientos evaluados modificó las coordenadas del espacio CIELab. En la luminosidad y tonalidad no hay diferencia estadística después de los pre tratamientos e hidrólisis ácida. El tratamiento 2 de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) al 70% favoreció una mejor saturación de color de 18.41 en el croma, mientras que el tratamiento 3 de ácido fluorhídrico (HF) al 50% tiene mejor intensidad cromática de 27.47, evidenciando que las condiciones de hidrólisis influyen sobre las propiedades ópticas del croma de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna. Para tener mayor saturación es con el uso del ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y para tener mayor intensidad cromática es en el uso del ácido fluorhídrico (HF).
3. La caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) evidenció estructuras compatibles con nanocristales de celulosa en el tratamiento 2 nos indicó una estructura sólida, aglomerada con varillas irregulares y porosidad con el uso de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) al 50% y estructura menos aglomerada e individual con el tratamiento 4 de ácido fluorhídrico (HF) al 70%, observándose partículas aglomeradas con morfología irregular, presencia de varillas y porosidad superficial, características asociadas al tratamiento químico y al proceso de sonicación empleados durante la obtención.
4. El análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) identificó la presencia de los grupos funcionales característicos de la celulosa que son los principales grupos funcionales hidroxilo, metileno y éter, que son indicadores de los estiramientos adecuados de una estructura de nanocristales de celulosa, con el mejor resultado en los tratamientos 1 y 2 con ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), así mismo, con estiramientos más bajos en los tratamientos 3 y 4 con ácido fluorhídrico (HF) demostrando que la estructura química característica de la celulosa se conservó después del proceso de hidrólisis ácida.

VII. RECOMENDACIONES

Para obtener mejor eficiencia de obtención de nanocristales, es recomendable usar otros tipos de residuos agroindustriales que se generan en el Perú, además de que se pueden identificar otras dimensiones nanométricas establecidas para los nanocristales de celulosa.

El uso de guantes, mascarillas, lentes protectores y una campana extractora de gases como precaución al momento de usar los ácidos sobre las muestras para evitar contaminación del medio ambiente así como accidentes en el área de trabajo por el potencial peligroso de algunos ácidos utilizados en esta investigación.

La hidrólisis ácida es crítica para el aislamiento de nanocristales de celulosa. Si bien el ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el estándar, el empleo de ácido fluorhídrico (HF) se plantea de manera experimental para tratar directamente la biomasa rica en sílice. Este enfoque busca contrastar cómo la fuerte capacidad para romper interacciones inter e intramoleculares de hidrógeno altera el rendimiento, la morfología y el índice de cristalinidad final en comparación con los métodos convencionales.

Realizar un estudio de rentabilidad para su uso en películas biodegradables de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna, en conjunto con una evaluación financiera sobre los costos de producción del residuo agroindustrial de la cáscara de tuna, con la finalidad de conocer la rentabilidad de este producto.

Realizar estudios sobre la influencia del tiempo en el tratamiento alcalino y el blanqueo realizados antes de la hidrólisis ácida para la obtención de nanocristales de celulosa.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Anton Paar GmbH. (2021). Kalliope: Software for automated SEM image acquisition and analysis (Version 2.0) [User manual]. Graz, Austria: Anton Paar GmbH.
- Arias, M. M. y Herrera, C. F. (2008). Mejoras en el procesamiento de mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas. Tesis de Licenciatura. Ingeniería en Alimentos. Universidad de Guanajuato. Pp. 36-39.
- Ashby, M. F; Ferreira, P. J.; Schodek D. L. “Nanomaterial Product Forms and Functions”. En: Ashby, M. F; Ferreira, P. J.; Schodek D. L. *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009, p. 403-465.
- Ávila Ramírez, J. A., Fortunati, E., Kenny, J., Torre, L., Errea, M. I., & Foresti, M. L. (2018). Esterificación superficial de nanocristales de celulosa catalizada por ácido cítrico. *Actas del Congreso SAP 2017. CONICET*.
- Báez Rodríguez, J. (2021). *Nanocristales de celulosa: aplicaciones en materiales sostenibles*. Editorial Académica Española.
- BAKAYOKO, M.; et al. "Bio-synthesis and characterization of nanoscaled CdO using corn husk extract via green nano-chemistry". *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- BLANCO, A., MONTE, M, C., CAMPANO, C., BALEA, A., MERAYO, N. & NEGRO, C. "Nanocellulose for Industrial Use: Cellulose Nanofibers (CNF), Cellulose Nanocrystals (CNC), and Bacterial Cellulose (BC)" [en línea]. Elsevier, 2018, ISBN 9780128133514. Disponible <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128133514000055>.
- BÖRJESSON, M.; & WESTMAN, G. *Crystalline Nanocellulose — Preparation, Modification, and Properties*. INTECH Open Science, 2015.
- Bruker Optics GmbH. (2019). IFS66v FTIR Spectrometer: User manual. Ettlingen, Germany: Bruker Optics GmbH.
- Calvo Peña, V., Álvarez Sánchez, M. Á., Güemes, L., Martínez-Barón, C., Baúlde, S., Criado, A., González-Domínguez, J. M., Maser, W. K., & Benito, A. M. (2023). Preparation of cellulose nanocrystals: controlling the crystalline type by one-pot acid hydrolysis. *ACS Macro Letters*, 12(2), 152–158. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00705>

- CARCHI, D. Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa. (Trabajo de titulación). Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas, Escuela de Ingeniería Química. (Cuenca- Ecuador). 2014.
- Carvalho, M. S., & Virgens, C. F. (2018). Effect of alkaline treatment on the fruit peel of *Pachira aquatica* Aubl.: Physico-chemical evaluation and characterization. *Microchemical Journal*.
- Coelho, C. C., Michelin, M., Cerqueira, M. A., Goncalves, C., Tonon, R. V., Pastrana, L. M., Teixeira, J. A. (2018). Cellulose nano-crystals from grape pomace: production, properties and cytotoxicity assessment. *Carbohydrate polymers*.
- Domínguez-Domínguez, M. M., Álvarez-Castillo, A., Granados-Baeza, M., & Hernández Campos, F. (2012). Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 13(4), 200-211.
- DU, H.; et al. "Cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils based hydrogels for biomedical applications". *Carbohydrate Polymers*, 2019 (China)
- EL MANSOURI, N. Despolimerización de lignina para su aprovechamiento en adhesivos para producir tableros de partículas. (Trabajo de titulación). (Doctorado). Universitat Rovira I Virgili, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería Química. Tarragona- España. 2006.
- ESPINOSA, E. Lignonanofibras de celulosa (LNFC) a partir de residuos agroindustriales no madereros. Obtención, caracterización y aplicaciones. (Trabajo de titulación). (Doctorado). Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias, Departamento de química inorgánica e ingeniería química. Córdoba- Argentina. 2019.
- Fernández Herrera, & Chañi Paucar, L. O. (2021). *Química: Conceptos básicos*. Editora Científica Digital. ISBN: 978-65-87196-79-4.
- Galarza Esparza, S. R., & Mena Díaz, J. I. (2021). Obtención de nanocelulosa mediante la hidrólisis ácida de la cáscara de *Solanum tuberosum*.
- García, D., Cordova-Ramos, J. S., Pilco-Quesada, S., Jave, J., & Ruiz, A. (2021). Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido de nanocelulosas de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*). *Agroindustrial Science*, 11(2), 149-157.
- HABIBI, Y., Heyraud, A., Mahrouz, M., and Vignon, M.(2004), Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. p.1120
- Herzka, A., & Booth, R. G. (1981). Food industry wastes: disposal and recovery. *Proceedings*.

- JURVETSON, Steve. Transcending Moore's Law With Molecular Electronics and Nanotechnology, 1 Nanotech. L. &B, 2004, vol. 70.
- K. Eric Drexler, Engines of Creation (1986); Neal Stephenson, The Diamond Age (1995). Consejo de los Estados Unidos para la Investigación, Small Wonders, Endless Frontiers: A Review of the National Nanotechnology Initiative 2 (2002). Raj Bawa, Nanotechnology Patenting in the US, 1 Nanotechnology L. & Bus. 31, 36 (2004).
- KARGARZADEH, HANIEH, IOELOVICH, M., AHMAD, I., THOMAS, S. & DUFRESNE, A., 2017. Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources. Handbook of Nanocellulose and Cellulose 10.1002/9783527689972.ch1.
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., and Lim, S.M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. Food and Nutrition 1361779. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- López Sánchez, N. M., & Díaz Zúñiga, M. C. (2018) Análisis situacional de las exportaciones de pulpa de tuna congelada peruana al mercado de Estados Unidos durante el periodo 2013-2017.
- López-Velázquez, L. Y., Salgado-García, S., Turrado-Saucedo, J., Hidalgo-Moreno, C. I., Ortiz-García, C. F., Córdova-Sánchez, S., Saucedo-Corona, A. R., & Canché-Escamilla, G. (2020). Celulosa y microcelulosa de residuos del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Agro Productividad, 13(4), 3–12. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1591>
- Maldonado Culquimboz, Y., & Salazar Ocampo, S. M. (2010). Extracción de pectina mediante el método de hidrólisis ácida en frutos de maushan (*vasconcellea weberbaueri* (harms) vm Badillo) en dos índices de madurez provenientes del distrito de San Miguel de Soloco, región Amazonas.
- MELIKOĞLU, A.; et al. "Optimum alkaline treatment parameters for the extraction of cellulose and production of cellulose nanocrystals from apple pomace". Carbohydrate Polymers [en línea], 2019, (Turquía) 215(1), pp. 330-337. [Consulta: 21 febrero 2021]. ISSN 01448617. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.103>.
- MUNGUÍA, D. Deslignificación de la penca de Agave tequilana F.A.C. Weber empleando peróxido de hidrógeno alcalino como tratamiento para la producción de biohidrógeno.

- (Trabajo de titulación). (Maestría). Instituto Potosiano de investigación científica y tecnológica. San Luis Potosí-México. 2016.
- Ochoa, J. R. (2007). Industria Química basada en biomasa. Implicaciones tecnológicas. Reporte. Fundación LEIA CDT. Madrid.
- Olalde, R. O., Suárez, E. J. D., & Pabello, J. A. G. (2015). Harina de cáscara de tuna como fuente de fibra y su efecto sobre las características físico-químicas y sensoriales de salchichas bajas en sodio y grasa. *Nacameh*, 9(2), 54-65.
- Orrabalís, C., Rodríguez, D., Pampillo, L. G., Londoño-Calderón, C., Trinidad, M., & Martínez García, R. (2020). Characterization of nanocellulose obtained from *Cereus Forbesii* (a South American cactus). *Materials Research*.
- P. Kumar, D.M. Barrett, M.J. Delwiche, P. Stroeve, Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48 (2009) 3713-3729.
- Peralta Holguín, W. E. (2021). Obtención de nanocristales de celulosa a partir de residuos agrícolas.
- Peralta, S., & Elizabeth, S. (2021). Obtención de nanocelulosa a partir de la hoja de mazorca de maíz (*Zea mays* L.) mediante el proceso de hidrólisis ácida.
- Pereira Damásio, R. A., & Santos, L. C. (2026). Estructura y polimorfismo de la celulosa. *Journal of Biomaterials Science*, 45(2), 12–25.
- Pérez-López, C. (2022). Diseño de experimentos: Fundamentos y aplicaciones con Statgraphics Centurion. Lulu Press.
- PHANTHONG, P.; et al. "Nanocellulose: Extraction and application". *Carbon Resources Conversion*, 2018, (China).
- RAHMAN, N.; et al. "Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from tea leaf waste fibers". *Polymers* [en línea], 2017, (Malasia) 9(11), pp. 1-11. [Consulta: 30 diciembre 2020]. ISSN 20734360. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym9110588>.
- RATNER, Vance; RATNER, Mark A. Size dependence of gradient and nongradient optical forces in silver nanoparticles. *JOSA B*, 2007, vol. 24, no 1, p. 106-112.
- Riva Reyes, G., Navarro Arzate, F., López Dellamary Toral, F., Robledo Ortiz, J., & JA, S. G. (2013). Elaboración de nanocompuestos de celulosa (NC) y ácido poliláctico (PLA) y estudio de sus propiedades mecánicas.

- Rocha, L. M. (2006). Enriquecimiento proteico por *Candida Utilis* en desechos agroindustriales de cáscara de tuna y cáscara de sábila.
- Ruiz Deance, A. L. (2020). Obtención de nanocristales de celulosa por hidrólisis ácida. Universidad Nacional Autónoma de México.
- S. Morales de la Rosa, J.M. Campos-Martin, J.L.G. Fierro, High glucose yields from the hydrolysis of cellulose dissolved in ionic liquids and Optimization of the process of chemical hydrolysis of cellulose to glucose, *Cellulose, Chem. Eng. J.*, 181-182 (2012, 2014)
- 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.
- Santos Lema, J. J., & Silva Arroyo, C. A. (2019). Obtención de nanocelulosa a partir de la cascarilla de arroz mediante hidrólisis ácida (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química.).
- Sistema Integrado de Información de Comercio Exterior (SIICEX). (2015). Guía de Requisitos de Acceso de Alimentos a los Estados Unidos. Lima: SIICEX.
- Tadahiro Azetsu, & Noriaki Suetake. (2021). Chroma Enhancement in CIELAB Color Space Using a Lookup Table. *Designs*, 5(2), 32–32. <https://doi.org/10.3390/designs5020032>
- Teixeira, E. D. M., Oliveira, C. R. D., Mattoso, L. H., Corrêa, A. C., & Paladin, P. D. (2010). Nanofibras de algodão obtidas sob diferentes condições de hidrólise ácida. *Polímeros*, 20, 264-268.
- Thermo Fisher Scientific. (2020). Scios 2 DualBeam FIB-SEM User Guide. Thermo Fisher Scientific.
- Tofeño Herrera, K. D. R. (2021). Preparación y caracterización de nanofibras de celulosa (CNF) de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*).
- Troya Ronquillo, A. Z. (2019). Investigación teórico-experimental sobre las aplicaciones de nanocelulosa en la obtención de materiales de construcción (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Vidales Carrillo, H. (2019). Métodos de extracción de nanocelulosa a partir de residuos de *Agave* spp.
- YADAV, C.; et al. "Plant-based nanocellulose: A review of routine and recent preparation methods with current progress in its applications as rheology modifier and 3D bioprinting". *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, (China).

ANEXO

Anexo 1

Matriz de Consistencia

	Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Metodología	Producto
	¿Cómo influye la hidrólisis ácida asistida mediante sonicación sobre la obtención de los nanocristales de celulosa y la caracterización a partir de cáscara de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>)?	Obtener y caracterizar nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>) mediante hidrólisis ácida.	La hidrólisis ácida influye en la obtención y caracterización de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>).	Tipo de ácido y concentración del ácido.	Para la obtención de los nanocristales de celulosa se utilizará el método de hidrólisis ácida por sonicación	Nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.
N°	Problema específico	Objetivo específico	Hipótesis específica	Variables	Metodología	Producto
1	¿Cuál es el efecto de la hidrólisis ácida en el rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna?	Evaluar la influencia de la hidrólisis ácida en el rendimiento de los nanocristales de celulosa.	La hidrólisis ácida afecta en el rendimiento de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.	El rendimiento del proceso de obtención de nanocristales de celulosa.	El rendimiento se calcula como la relación entre masa obtenida y masa inicial multiplicada por 100%.	Resultados de cálculo del rendimiento.

2	¿Cómo influye la hidrólisis ácida sobre el color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna?	Analizar el efecto de la hidrólisis ácida en el color de los nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna.	La hidrólisis ácida influye en el color de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna.	El color de los nanocristales de celulosa.	El espacio CIE L* a* b* para determinar el color. Según Canada Beef, el rendimiento es el peso inicial de la muestra sobre el producto final, todo esto multiplicado por el cien.	Resultados obtenidos en las coordenadas L* a* y b*.
3	¿Cuál es la caracterización de la estructura morfológica mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)?	Caracterizar la estructura morfológica de los nanocristales de celulosa mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).	La estructura morfológica de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna se caracterizan mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).	Estructura morfológica de los nanocristales de celulosa.	Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).	Resultados de la estructura morfológica.
4	¿Cómo influye la hidrólisis ácida sobre los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)?	Evaluar e identificar los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de la cáscara de tuna mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).	Los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa de cáscara de tuna se identifican mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).	Los grupos funcionales de los nanocristales de celulosa.	El análisis de Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).	Resultados de los grupos funcionales del laboratorio.

Anexo 2

Balance de Masa Completo

Etapas:	Masa (gramos)	
	Entrada	Salida
Etapas 0-1: Lavado + Secado (30 días al sol)		
Entrada: Cáscara de tuna fresca	10000	
Salida: Cáscara seca (después de lavado y secado)		1980
Pérdida: Agua evaporada durante el secado + tierra/polvo removidos en el lavado		8020
Etapas 2-3: Molienda + Tamizado (tamiz 120, tamiz 230 y otros)		
Entrada: Cáscara seca	1980	
Salida 1: Harina retenida en tamiz 230 (0.063 mm) — seleccionada para el estudio		480
Salida 2: Harina de los otros 3 tamices (granulometría más gruesa) — no utilizada		1220
Pérdida: Material perdido en la molienda + partículas que no pasaron por ningún tamiz		280
Etapas 4-5: Selección de la muestra de estudio		
Entrada: Harina tamiz 230 disponible	480	
Salida: Harina utilizada en el estudio (4 tratamientos × 40 g)		160
Pérdida: Excedente de harina no llevado a experimentación (no es pérdida real de proceso)		320
Etapas 6-7: Primer lavado (agua destilada, 70°C, 600 rpm, 2h) — por tratamiento		
Entrada sólido: Harina de cáscara de tuna	40.00	
Entrada líquida: Agua destilada (400 mL)	400.00	
Entrada total	440.00	
Salida sólido: Muestra filtrada con tela de organza		35.47
Salida líquida: Filtrado (agua + sólidos disueltos/arrastrados)		404.53
Pérdida: Sólidos disueltos/arrastrados en el filtrado y residuos removidos con el agua de lavado		4.53
Etapas 8-9: Segundo lavado (ácido acético + dióxido de cloro, 60°C, 90 min) — por tratamiento		
Entrada sólido: Muestra del primer lavado	35.47	
Entrada líquida: Agua (1300 mL) + dióxido de cloro (26 mL) + ácido acético (13 mL)	1339.00	
Entrada total	1374.47	
Salida sólido: Muestra filtrada y lavada hasta pH 6-7		27.85
Salida líquida: Filtrado (agua + reactivos + sólidos solubilizados)		1346.62
Pérdida: Componentes solubilizados por el ácido acético/dióxido de cloro y pérdidas en filtrado y lavado		7.62
Etapas 10-11: Tratamiento alcalino (KOH 3% m/v, 70°C, 90 min) — por tratamiento		
Entrada sólido: Muestra del segundo lavado	27.85	
Entrada líquida: Agua (1426 mL) + KOH (42.78 g)	1468.78	
Entrada total	1496.63	

Salida sólido: Muestra filtrada y lavada hasta aclarar el color del agua	19.71
Salida líquida: Filtrado (agua + KOH + hemicelulosa/residuos solubilizados)	1476.92
Pérdida: Remoción de hemicelulosa, lignina y residuos solubilizados por el KOH, más pérdidas de filtrado/lavado	8.14
Etapa 6: Blanqueamiento (NaClO 1.7%) + secado (36h) + molienda — por tratamiento	
Entrada sólido: Muestra del tratamiento alcalino	19.71
Entrada líquida: Agua+NaClO (835+14.195 mL) + solución buffer (835 mL)	1684.20
Entrada total	1703.91
Salida sólido: Muestra deslignificada, blanqueada, seca y molida	9.20
Salida líquida/vapor: Filtrado + agua evaporada en el secado	1694.71
Pérdida: Remoción de hemicelulosa y lignina residual por el hipoclorito de sodio + agua evaporada en el secado	10.51
Etapa 7: Hidrólisis ácida + sonicación — por tratamiento	
Entrada sólido: Muestra deslignificada y blanqueada	9.20
Entrada líquida: Solución ácida (10 mL/g)	92.00
Entrada total	101.20
Salida sólido T1: Nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna	5.31576
Salida líquida T1: Sobrenadante + agua de lavado + filtrado	95.88424
Pérdida T1: Fracción de celulosa hidrolizada/solubilizada + sobrenadante descartado en centrifugación + pérdidas de filtrado y lavado	3.88424
Rendimiento T1: Salida sólido T1/ Entrada sólido x 100%	57.78 %
Salida sólido T2: Nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna	6.66632
Salida líquida T2: Sobrenadante + agua de lavado + filtrado	94.53368
Pérdida T2: Fracción de celulosa hidrolizada/solubilizada + sobrenadante descartado en centrifugación + pérdidas de filtrado y lavado	2.53368
Rendimiento T2: Salida sólido T2/ Entrada sólido x 100%	72.46%
Salida sólido T3: Nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna	4.37736
Salida líquida T3: Sobrenadante + agua de lavado + filtrado	96.82264
Pérdida T3: Fracción de celulosa hidrolizada/solubilizada + sobrenadante descartado en centrifugación + pérdidas de filtrado y lavado	4.82264
Rendimiento T3: Salida sólido T3/ Entrada sólido x 100%	47.58%
Salida sólido T4: Nanocristales de celulosa a partir de cáscara de tuna	6.302
Salida líquida T4: Sobrenadante + agua de lavado + filtrado	94.898
Pérdida T4: Fracción de celulosa hidrolizada/solubilizada + sobrenadante descartado en centrifugación + pérdidas de filtrado y lavado	2.898
Rendimiento T4: Salida sólido T4/ Entrada sólido x 100%	68.50%

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3*Fotografías del Área Experimental de la Obtención de Nanocrisales de Celulosa***Foto 01****Secado de Cáscara de Tuna**

Lugar: Ambiente abierto para el secado a temperatura ambiente.

Fecha: 26/04/2024

Foto 02**Cáscara de Tuna Seca**

Lugar: Ambiente para el secado a temperatura ambiente

Fecha: 26/05/2024

Foto 03**Pesado de la Cáscara de Tuna**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 27/06/2024

Foto 04**Molienda de la Cáscara de Tuna**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 27/06/2024

Foto 05**Tamizado de la Harina de Cáscara de Tuna**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 27/06/2024

Foto 06**Preparación de la Solución para el Tratamiento Alcalino**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 27/06/2024

Foto 07**Lavado Mediante Centrifugación**

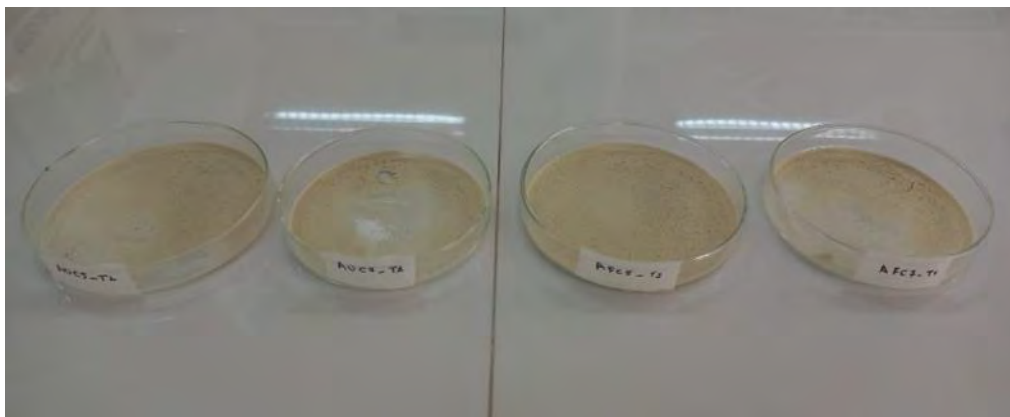
Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 28/06/2024

Foto 08**Tratamiento Ácido con Ácido Oxálico y Ácido Fluorhídrico**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 01/07/2024

Foto 09**Secado de los Tratamientos Después del Tratamiento Ácido**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 03/07/2024

Foto 10**Ultrasonido Asistido por Sonicación**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 04/07/2024

Foto 11**Secado Después del Tratamiento Ácido Asistido por Sonicación**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 04/07/2024

Foto 12**Nanocrisales de Celulosa de Cáscara de Tuna**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 04/07/2024

Foto 13**Pesado de los Nanocrisales de Celulosa para Obtener el Rendimiento**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 01/08/2024

Foto 14**Acondicionamiento de las Muestras para Medir el Color**

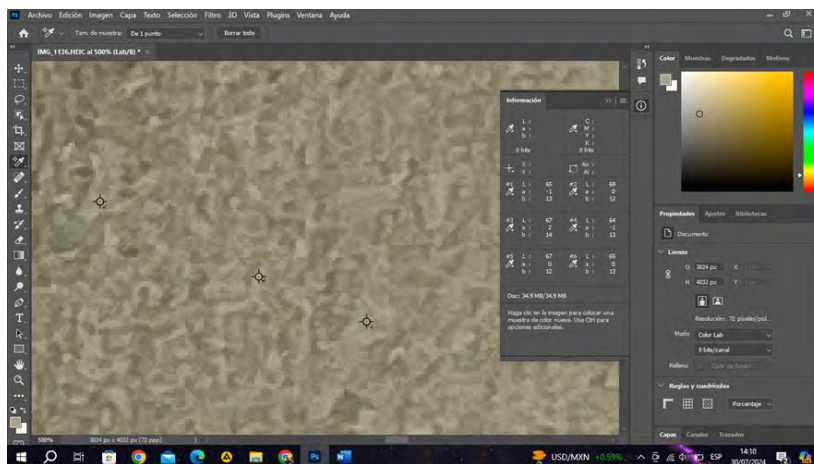
Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 01/08/2024

Foto 15**Caja de Luz Acondicionada para Medir el Color**

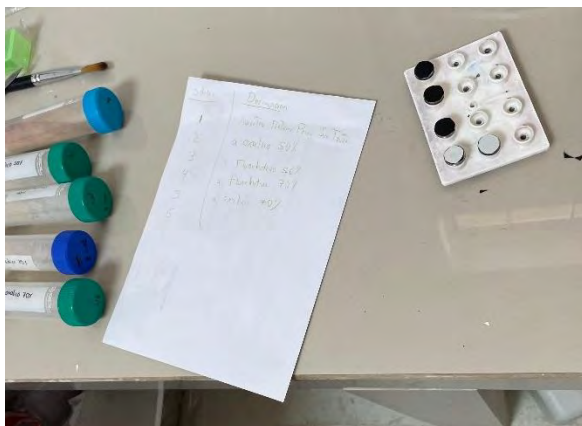
Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 01/08/2024

Foto 16**Sistema de Visión Computarizada**

Lugar: Laboratorio de Investigación – EPIA

Fecha: 01/08/2024

Foto 17**Acondicionamiento de las Muestras para el Metalizado Previo para SEM**

Lugar: Laboratorio de Microscopía Electrónica - PIM

Fecha: 12/08/2024

Foto 18**Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido**

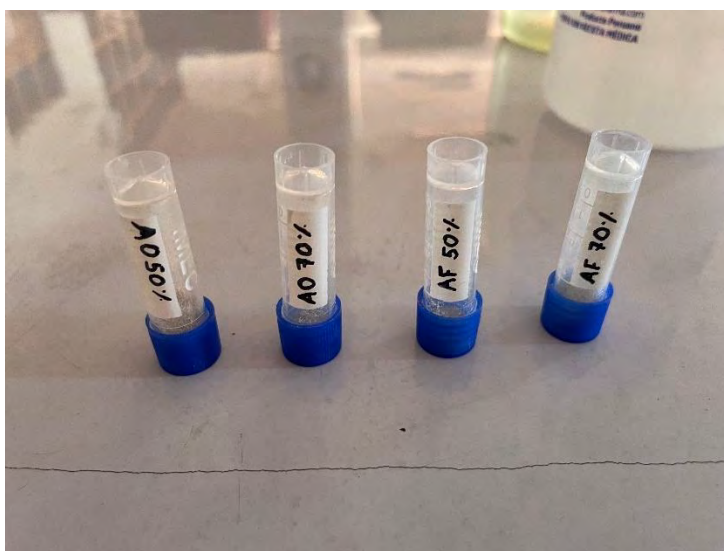
Lugar: Laboratorio de Microscopía Electrónica - PIM

Fecha: 12/08/2024

Foto 19**Observación de la Estructura Morfológica de los Nanocrisales de Celulosa**

Lugar: Laboratorio de Microscopía Electrónica - PIM

Fecha: 12/08/2024

Foto 20**Acondicionamiento de las Muestra para el Análisis de FTIR**

Lugar: Laboratorio de Química - APEIQ

Fecha: 23/08/2024