

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN Y
ALIMENTOS**

TESIS PROFESIONAL

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL
Y MORFOLÓGICA DEL ALMIDÓN DE
PATERNA PARA EVALUAR SU
POTENCIAL ALIMENTICIO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

PRESENTA

KAREN ITZEL GERONIMO BETANZOS

DIRECTORA DE TESIS

MC. MA. EMPERATRIZ DOMÍNGUEZ ESPINOSA

ASESOR EXTERNO

DRA. NDAHITA DE DIOS ÁVILA



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesora la Mtra. María Emperatriz Domínguez Espinosa por el apoyo en la realización de este proyecto, quien, con su amplio conocimiento, supo instruirme en este camino, además por confiar en mis capacidades dándome la motivación necesaria para finalizar este trabajo.

A la Dra. Ndahita de Dios Ávila, investigadora de la Unidad de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit, por su apoyo en la realización de este trabajo.

Al Mtro. Mario Alberto Morales Ovando por guiarme en diversos experimentos de esta investigación.

A la Dra. Rocío Magdalena Sánchez Albores, por su apoyo en la realización de diversos experimentos en el laboratorio de Materiales y Procesos Sustentables del Instituto de Investigaciones e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

Al Dr. Odín Reyes Vallejo, por su apoyo en la realización de diversos experimentos en la sección de electrónica de estado sólido del CINVESTAV Zacatenco.

Al Médico Arturo Ruiz Jiménez del laboratorio de Análisis de Alimentos II de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, por acompañarme durante este proceso mientras realizaba la experimentación y ser muy paciente conmigo.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado especialmente a mis padres Luis Geronimo López y Violeta Betanzos Morales, por sus sabios consejos, por el amor y apoyo incondicional que me brindaron durante este proceso. Gracias por ser los primeros en impulsarme a seguir adelante con mis sueños y creer en mí a toda costa, sin importar lo que decían lo demás.

A mi hermano y su familia por apoyarme y alentarme a seguir continuando, a pesar de la distancia siempre tienen una palabra de aliento para querer seguir mejorando.

A mis maestros de la carrera, quienes se esforzaron en compartir sus conocimientos y siempre depositaron su confianza y esperanza en mí.

A mi compañero de casa, quien me escucho cuando más lo necesitaba y siempre tenía palabras asertivas para motivarme, gracias por consentirme en todos los aspectos, haciendo más ameno esta aventura.

A mis abuelos Luis y Ernesta, que acaecieron mientras me encontraba durante este proceso, este logro es para ustedes en donde quiera que se encuentren.

Y me dedico este logro, por todo el esfuerzo que hice para concluir esta investigación, a pesar de las adversidades fui resiliente y pude cumplir mis objetivos.

“Un poco más de persistencia, un poco más de esfuerzo, y lo que parecía irremediamente un fracaso puede convertirse en un éxito glorioso”

-Elbert Hubbard



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACION ESCOLAR



Autorización de Impresión

Lugar y Fecha: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 11 de noviembre de 2022

C. Karen Itzel Gerónimo Betanzos

Pasante del Programa Educativo de: Ciencia y Tecnología de Alimentos

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Caracterización estructural y morfológica del almidón de paterna para evaluar su
potencial alimenticio

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Ing. Yadira del Rocío Sánchez Oropeza

Mtro. Mario Alberto Morales Ovando

Mtra. María Emperatriz Domínguez Espinosa



COORDINACIÓN
DE TITULACIÓN

Firmas

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVOS.....	4
GENERAL	4
ESPECÍFICOS	4
MARCO TEÓRICO	5
PATERNA O CUAJINICUIL (<i>INGAJINICUIL</i>)	5
Composición química	7
Propiedades funcionales y usos de la paterna.....	8
ALMIDÓN	9
ALMIDÓN MODIFICADO	9
Acetilación	11
Oxidación.....	11
ESTRUCTURA QUÍMICA DEL ALMIDÓN	12
ESTRUCTURA DEL GRÁNULO DE ALMIDÓN	13
Morfología	13
Estructura cristalina.....	14
Características estructurales.....	14
USO DE ALMIDÓN EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA	15
HIPÓTESIS	16
METODOLOGÍA.....	17

TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	17
SITIO EXPERIMENTAL.....	17
MATERIAL BIOLÓGICO.....	17
PROCESO.....	18
Descripción de reactivos y equipos.....	18
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS.....	20
Acetilación de almidón.....	20
Oxidación de almidón.....	20
Difracción de rayos X (DRX).....	21
Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	22
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
MODIFICACIÓN DEL ALMIDÓN NATIVO DE PATERNA.....	25
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	27
ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER.....	29
CONCLUSIONES.....	34
REFERENCIAS DOCUMENTALES.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Paterna	5
Figura 2. Representación de la reacción de acetilación de almidón con anhídrido acético.....	11
Figura 3. Reacciones presentes durante el proceso de oxidación	12
Figura 4. Estructura de la amilosa	12
Figura 5. Estructura de la amilopectina	13
Figura 6. Representación esquemática de la estructura granular del almidón.....	15
Figura 7. Diagrama de flujo del desarrollo de las etapas de la investigación.....	19
Figura 8. Interacción de los rayos-X sobre átomos ordenados.....	22
Figura 9. Diagrama de los componentes del microscopio MEB	23
Figura 10. Pérdida de peso del almidón en el proceso de acetilación.	25
Figura 11. Micrografías de las muestras a) almidón control b) Nativo paterna c) Oxidado al 5 % y d) Acetilado al 5 %.....	27
Figura 12. Diferencias de intensidad del espectro FTIR para muestras de almidón control, nativo, oxidado al 5 % y acetilado al 5 %.	30
Figura 13. Patrones de difracción de almidón control, nativo, acetilado y oxidado al 5 %.	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía del género <i>Inga</i>	6
Tabla 2. Composición química de la pulpa y semilla de paterna.....	7
Tabla 3. TEAC y ORAC en <i>Inga edulis</i>	8
Tabla 4. Codificación de almidones modificados.....	10
Tabla 5. Resultados de contenido de humedad en los almidones.....	26

INTRODUCCIÓN

El almidón es un polímero que se encuentra distribuido en diversas partes de las plantas: semillas, fruta, hojas, tubérculos y raíces. Ha sido utilizado en diferentes industrias, como la textil, papel o alimentaria, debido a los atributos que posee, como la capacidad de retención de líquido o gelificación; sin embargo, existen limitaciones al utilizar almidones nativos debido a sus propiedades intrínsecas por lo que se han realizado estudios para modificarlos física, química o microbiológicamente, con el objetivo de mejorar sus características funcionales (Sánchez, 2020).

Actualmente, las industrias han realizado modificaciones en almidones nativos, de tipo física, química o enzimático. Unas de las modificaciones químicas más utilizadas son la acetilación y la oxidación; la primera es un proceso en donde los grupos de hidroxilo de los monómeros de glucosa son sustituidos por acetilo, el cual es producido con ácido acético en un medio alcalino con hidróxido de sodio (Anchundia, 2019), la oxidación se realiza con hipoclorito de sodio, en ella se impulsa la conversión de los grupos hidroxilos de las unidades de anhidro glucosa a grupos carbonilos y carboxilos. En ambas modificaciones obtenemos distintas ventajas y propiedades, que aumentan su funcionalidad y por lo tanto su aplicación.

Por otro lado, se han realizado estudios con almidones obtenidos de fuente no convencionales, como con la paterna, que pertenece al género *Inga*, los cuales son árboles de tamaño mediano a grande que se reproducen mediante sus semillas, produciendo frutos en forma de vainas que se abren longitudinalmente a lo largo de dos suturas (Sánchez, 2016), los resultados han demostrado gran potencial de uso en diferentes industrias.

Por lo anterior la presente investigación tiene como objetivo la caracterización estructural y morfológica del almidón de paterna para evaluar su potencial alimenticio, realizando modificaciones químicas, como oxidación y acetilación, con la finalidad de determinar el efecto que tienen estos procesos en el almidón de paterna, y determinar su posible uso en la industria de alimentos.

JUSTIFICACIÓN

El almidón ha sido ampliamente utilizado en la industria de los alimentos, derivado de su importancia y su creciente demanda se han buscado fuentes alternativas para su obtención, llamadas no convencionales, sin embargo, estudios han hecho visible algunas limitantes para su uso, en ese sentido se ha buscado modificar sus propiedades mediante métodos físicos, químicos y enzimáticos para obtener mejores propiedades y versatilidad.

El fruto de cuajinicuil o paterna, es una de las especies nativas que aporta beneficios que no han sido suficientemente cuantificados. Se encuentra en las regiones tropicales de México, la especie es parte de los bosques mesófilos de las montañas y de ribera, que crece a lo largo de los ríos. El árbol se usa primordialmente para sombra en plantaciones de café y naranja y en los bordes entre plantaciones para demarcar propiedades rurales (Niembro,2009).

Ortega en 2022, demostró que sus semillas tienen un alto contenido de carbohidratos, 60%, siendo el almidón el principal (Ortega, 2020), derivado de este estudio se ha propuesto utilizarlo como fuente no convencional de almidón para evaluar su potencial en la industria alimenticia.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El almidón es muy utilizado en la industria alimentaria, por lo que su demanda se ha incrementado, lo anterior, porque es utilizado como aditivo en el diseño de alimentos, ya que tiene la capacidad de modificar la textura, consistencia, humedad y estabilidad. Asimismo, es utilizado en la industria del papel y cartón, industria petrolera, textil, farmacéutica, doméstica y entre muchas otras.

Sin embargo, el almidón puede tener ciertas limitantes por lo que se acude a modificar la estructura de este polímero, lo que le proporcionara más versatilidad.

La obtención del almidón puede ser de frutas, tubérculos u hojas convencionales o no convencionales. Dentro de los no convencionales, encontramos a la paterna, fruto del que no se tiene mucha información acerca de su aprovechamiento y únicamente su uso primordial es dar sombra a cultivos de café y naranja.

El presente proyecto es creciente interés para la industria, ya que se utiliza el almidón obtenido de las semillas de la paterna y se realizan modificaciones químicas para evaluar el efecto de estas, sobre las características morfológicas y estructurales del almidón nativo.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el efecto de la acetilación y oxidación sobre las características morfológicas y estructurales del almidón de paterna para determinar su uso potencial en la formulación de alimentos.

ESPECÍFICOS

- Caracterizar el almidón de paterna nativo, oxidado y acetilado mediante pruebas estructurales.
- Caracterizar el almidón de paterna nativo, oxidado y acetilado mediante pruebas morfológicas.
- Determinar la variabilidad estructural y morfológica del almidón de paterna oxidado y acetilado contrastando con el almidón nativo.

MARCO TEÓRICO

PATERNA O CUAJINICUIL (*Inga jinicuil*)

Inga es un grupo de especies que pertenece a la familia de las leguminosas, y en específico a la de las fabáceae. Son árboles de tamaño mediano a grande y pueden diferenciarse por el tamaño y forma de la hoja por la copa y la tolerancia al tipo de suelo (Sánchez, 2016).

Es nativo de las regiones tropicales de México, se distribuye en los estados de Puebla, Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco. La especie es parte de los bosques mesófilos de las montañas y de galería, que crece a lo largo de los ríos (Niembro, 2009).

La paterna es un árbol de copa densa, que alcanza hasta de 30 m de altura, con diámetros de 30 a 60 cm de tronco. Comienza a dar frutos en el tercer y cuarto año después del trasplante, y alcanza la capacidad máxima de fructificación de la planta hasta los ocho diez años.

El árbol se usa primordialmente para sombra en plantaciones de café y naranja, y en los bordes entre plantaciones para demarcar propiedades rurales (Niembro, 2009).

Producen frutos en forma de vainas son oblongas y aplanadas, pueden ser rectas o ligeramente curvas, de 15 a 30 cm de largo por 5 a 6 cm de ancho, con cáscara verde amarillenta, lisa y fibrosa. Cada fruto puede contener de 12 a 18 semillas (Alegría y cols., s.f). En la figura 1 se pueden apreciar las características descritas.



Figura 1. Paterna (Rivera, 2006)

Su cultivo no está ampliamente distribuido ni se hace de manera comercial; sin embargo, contribuye al sustento de las comunidades que recolectan el fruto y lo comercializan (Sánchez, 2016).

Las ingas, al igual que otras leguminosas arbóreas, tienen como característica distintiva la producción de frutos en forma de legumbres o vainas, en la tabla 1 se presenta la información taxonómica del género *Inga*.

Tabla 1. Taxonomía del género *Inga*

Reino	Plantae	
División	Magnoliophyta	
Clase	Magnoliopsida	
Orden	Fabales	
Familia	Fabaceae (leguminosae)	
Subfamilia	Mimosoideae	
Tribu	Ingeae	
Género	Inga	
Algunas especies	<i>Inga edulis mart</i> <i>Inga vera</i> <i>Inga paterna</i> <i>Inga jinicuil</i>	<i>Inga schippi harms</i> <i>Inga spectabilis willd</i> <i>Inga densiflora</i> <i>benth</i> <i>Inga feuillei,</i>

Adaptado: Ortega, 2020

En cuanto al árbol, es una especie que se cultiva ampliamente en México y Centroamérica como sombra para las plantaciones de café y cacao, sin embargo, este no es el único uso que tiene, ya que es una especie que favorece a la apicultura.

El néctar es el recurso principal de inga, aunque también se reporta como fuente de polen para las abejas de castilla y abejas sin aguijón como el chúmelo (*Tetragonisca angustula*) y otras (*Melipona rufiventris*, *M. fuliginosa*, *M. marginata*), (Sandker y cols., 2005).

Composición química

La familia de leguminosas de la cual forma parte el género *Inga*, presenta un contenido de nutrientes considerables. Sus semillas contienen un valor entre el 10% al 30% de proteínas, alrededor del 60% de carbohidratos, principalmente almidón, siendo una buena fuente de energía y fibra. También aporta minerales, como el calcio siendo una fuente mayor que los cereales, contiene hierro y vitaminas del complejo B, como tiamina y riboflavina (Ortega, 2020).

En la tabla 2 se presenta la composición nutrimental por cada 100 gramos de la pulpa madura y de las semillas:

Tabla 2. Composición química de la pulpa y semilla de paterna.

	Paterna, pulpa (<i>Inga edulis</i>)	Jinicuil crudo (semillas)
Energía	60 kcal	159 kcal
Agua	83 g	57.3 g
Proteína	1 g	11.88 g
Grasa total	0.1 g	0.94 g
Carbohidratos totales	15.5 g	27.03 g
Fibra cruda	-	2.9 g
Fibra dietaria	-	.
Cenizas	0.4 g	2.2
Calcio	21 mg	35 mg
Fosforo	20 mg	14 mg
Hierro	0.9 mg	0.7 mg
Tiamina	0.04 mg	0.06 mg
Riboflavina	0.06 mg	0.05 mg
Niacina	0.4 mg	0.4 mg
Vitamina C	9	2 mg

Adaptado de: Ortega, 2020

En una investigación llevado a cabo por Silva y cols., (2007), llamada “Antioxidant activities and polyphenolic contents of fifteen selected plant species from the Amazonian region”, mostró la

capacidad antioxidante de *Inga edulis*, medida por TEAC (capacidad antioxidante equivalente de Trolox) y ORAC (Capacidad de absorción de radicales de oxígeno). En la tabla 3 se describen las partes de la planta en la cual se encontró mayor actividad antioxidante y capacidad de absorción de radicales de oxígeno.

Tabla 3. TEAC y ORAC en *Inga edulis*

Parte de <i>Inga edulis</i>	TEAC $\mu\text{mol}_{\text{TE}}/\text{g}_{\text{FW}}$	ORAC $\mu\text{mol}_{\text{TE}}/\text{g}_{\text{FW}}$
Hoja	58.1	239.5
Corteza	31.4	200.7
Fruta	2.2	17.5
Semilla	1.0	8.9

Adaptado de: Silva, 2007

Propiedades funcionales y usos de la paterna

Consumir la pulpa de la paterna es beneficioso y muy útil para prevenir enfermedades en el sistema cardiovascular, debido a su poder antioxidante que ayuda a la prevención del cáncer. Además, al ser producto natural rico en fibra, regula el funcionamiento del sistema digestivo, previniendo el estreñimiento, ayuda a eliminar toxinas y disminuye los niveles de colesterol en la sangre (Quinche, 2021).

El sabor de la pulpa es dulce, la cual puede comerse fresca o para elaborar bebidas alcohólicas. Contienen compuestos químicos esenciales en los alimentos que ayudan con la activación de las propiedades organolépticas naturales, su conservación y que, al ser ingeridas defienden de manera eficaz la salud del cliente (Quinche, 2021).

En cuanto a los árboles de este género *Inga* son usados en proyectos de arboricultura, recuperación de suelos y estabilización de cauces fluviales; esto puede atribuirse a su rápido crecimiento y su alta capacidad de recuperación después de una poda drástica. En cuanto a las hojas y semillas son empleados como medicina tradicional, usadas como astringentes en enfermedades intestinales, diuréticos y como antirreumáticas. Y además por su elevado contenido de proteína, es utilizado como alimento para animales (Ortega, 2020).

ALMIDÓN

El almidón es la fuente de carbohidratos más importante para la nutrición humana, es un polímero natural existente en los vegetales con una presencia aproximadamente de 60 millones de toneladas anuales en el mundo, su aplicación mayoritaria es en alimentos como espesantes, emulsificantes, gelificantes, entre otros (Jiménez, 2019).

El tamaño, forma y composición de los gránulos depende de la bioquímica de los amiloplastos, así como también de la fuente botánica e, incluso de la fisiología de la planta, lo que resulta de gran utilidad para su identificación al microscopio (Hernández, 2016).

Recientemente se ha incrementado el interés por la utilización de almidón en las formulaciones para crear recubrimientos comestibles, debido a que es un material que se obtiene de forma abundante a bajo costo y que provee un carácter biodegradable (León, 2018).

Los dos polisacáridos, la amilosa y amilopectina constituyen el 98% del 99% de los almidones nativos en base seca junto con cantidades menores de lípidos, proteínas, minerales y fósforo en forma de ésteres de fosfato de glucosa (Cuenca, 2020).

Un almidón nativo, tiene un alto nivel de retrogradación, por lo cual es proclive a la descomposición térmica y presenta alto grado de dilución en presencia de agua debido a su carácter hidrofílico (León, 2018). Por esta razón, para su aplicación industrial es necesario que su estructura sea previamente modificada con el fin de potencializar su función.

Las modificaciones de los almidones han sido utilizadas durante mucho tiempo para mejorar las propiedades, estas pueden ser físicas, químicas o enzimáticas; generalmente las mejores que se obtienen con estas modificaciones, son espesantes, emulgentes y estabilizadoras. Sin embargo, es importante mencionar que pueden cambiar las propiedades funcionales del almidón (Olivero y cols., 2020). En la tabla 4 se muestran los almidones clasificados de acuerdo a su modificación.

Almidón modificado

Un almidón modificado se puede describir como “cualquier producto en el cual las propiedades fisicoquímicas del almidón nativo han sido alteradas” (). Las modificaciones han sido utilizadas durante mucho tiempo para mejorar las propiedades, estas pueden ser físicas, químicas o enzimáticas; generalmente las mejores que se obtienen con estas modificaciones, son espesantes, emulgentes y estabilizadoras. Sin embargo, es importante mencionar que pueden cambiar las

propiedades funcionales del almidón (Olivero y cols., 2020). En la tabla 4 se muestran los almidones clasificados de acuerdo a su modificación.

Tabla 4. Codificación de almidones modificados

Código E	Nombre
1401	Almidón ácido
1402	Almidón alcalino
1403	Almidón blanqueado
1404	Almidón oxidado
1405	Almidón enzimático
1410	Fosfato monoalmidón
1412	Fosfato dialmidón
1413	Fosfato dialmidón fosfatado
1414	Fosfato dialmidón acetilado
1420	Almidón acetilado
1422	Adipato de dialmidón acetilado
1440	Hidroxipropil almidón
1442	Fosfato dialmidón hidroxipropilado

Fuente: Olivero y cols., 2020

La modificación química usada frecuentemente es la sustitución, en donde se introducen sustituyentes voluminosos en las cadenas de almidón reduciendo la cristalización de la amilosa y la amilopectina (Ramos, 2018). Pueden alterar propiedades del almidón nativo como formación de pasta, relación de sólido/viscosidad, resistencia de los almidones a la disminución de la viscosidad por la adición de ácidos, calor y acción mecánica entre otros (Calafell, 2020). El objetivo de las modificaciones es resaltar su versatilidad y asimismo corregir limitaciones que pueda tener el almidón una vez modificados estos tienen un amplio rango de aplicación en distintas industrias.

Acetilación

La acetilación es una modificación química usada por la industria de los alimentos, es un proceso mediante el cual parte de los grupos hidroxilos de los monómeros de glucosa son sustituidos por acetilos, es producida con ácido acético en un medio alcalino con hidróxido de sodio (Anchundia, 2019). El carácter hidrofóbico de los grupos acetilos reduce las fuerzas entre las moléculas de almidón, produciendo una reducción en los puentes de hidrógeno como resultado de las repulsiones electrostáticas intra e intermoleculares (Ramos, 2018). Esta modificación química mejora sus propiedades funcionales, como la disminución en la temperatura de gelatinización, incrementa la capacidad de hinchamiento y solubilidad.

El proceso de la acetilación se lleva a cabo por una reacción de esterificación en el esqueleto del almidón, sustituyendo los grupos OH por grupos químicos bloqueadores ($\text{CH}_3\text{-C}=\text{O}$) que propician un entorno hidrofóbico en el almidón, debido a esto se les clasifica también como almidones esterificados (Calafell, 2018) como se puede observar en la figura 2.

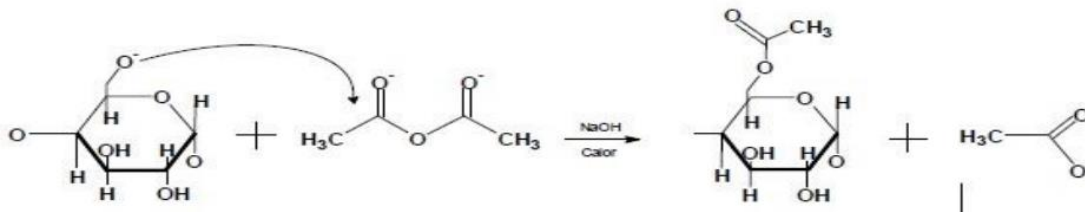


Figura 2. Representación de la reacción de acetilación de almidón con anhídrido acético (León y cols., 2020).

Oxidación

El almidón oxidado se usa en la industria del papel, textil, farmacéutica, alimentaria y biotecnología, más específicamente en procesos de producción de pan como acondicionador de masa, sustituto de goma arábiga y propiedades de recubrimientos. Debido a las propiedades fisicoquímicas que derivan del mismo, como baja viscosidad, alta claridad y buena estabilidad a baja temperatura. (Gutiérrez, 2020). Para realizar esta modificación comúnmente el agente más utilizado es el hipoclorito de sodio, el proceso ocurre mediante el cloro libre, introduciendo grupos carboxilos y carbonilos. El curso de todas estas reacciones y el equilibrio entre ellas determinan las propiedades del almidón oxidado y dependerá del pH al que se ha llevado la reacción. En la figura 3 se muestra el proceso de oxidación, en la parte superior los grupos

hidroxilos se oxidan a grupos carbonilos y posteriormente a grupos carboxilos. Y en la parte inferior, la oxidación induce la degradación de las moléculas de almidón, al escindir los enlaces glucosídicos α -1-4

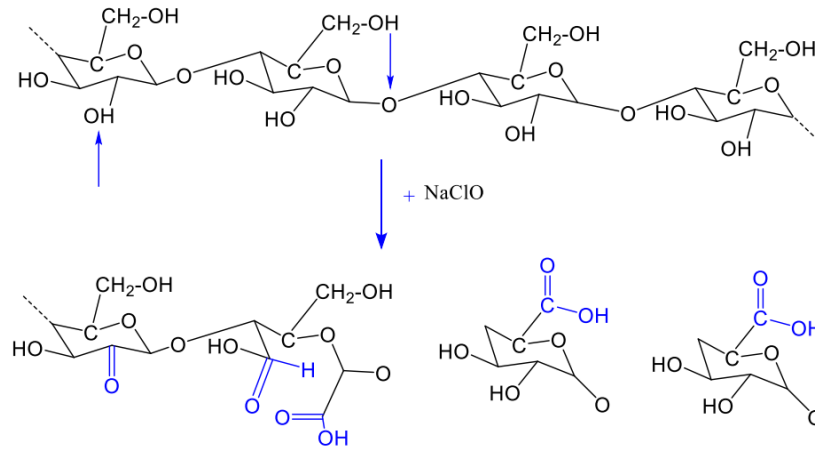


Figura 3. Reacciones presentes durante el proceso de oxidación (Gutiérrez, 2020)

Estructura química del almidón

La amilosa es esencialmente un polímero, comprende casi el 20% en masa del almidón (McMurry, 2012) en el cual las unidades de anhidro glucosas están presentes y unidas en mayor parte por enlaces glucosídicos α (1-4) y un leve grado de ramificación en enlaces α (1-6) como se observa en la figura 4. Tiene un peso molecular promedio de 10^5 a 10^6 g/mol³. La amilosa tiene una estructura helicoidal, en el interior de la hélice, contiene átomos de hidrógeno, mientras que los grupos hidroxilos permanecen en el exterior (León y cols., 2020).

La amilosa es la que origina el color azul que se produce cuando el almidón reacciona con el yodo.

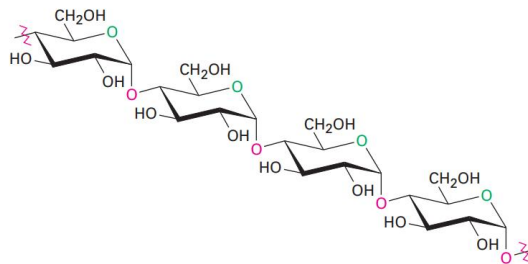


Figura 4. Estructura de la amilosa (McMurry,2012)

Se puede separar de la amilopectina mediante la formación de un complejo insoluble con líquido apropiado como el alcohol butílico. La enzima β -amilasa hidroliza casi en su totalidad la amilosa en maltosa. (Fox y cols., 2006).

En cuanto a la amilopectina comprende 80% restante del almidón y es más compleja en estructura que la amilosa (McMurry, 2012) contiene ramificaciones que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las ramas están unidas al tronco central por enlaces α -D-(1-6), localizada cada 15-25 unidades lineales de glucosa, en la figura 5 se aprecia la estructura de la amilopectina. Su peso molecular es muy alto, ya que algunas fracciones llegan a alcanzar hasta 200 millones de daltones (Argueta, 2019).

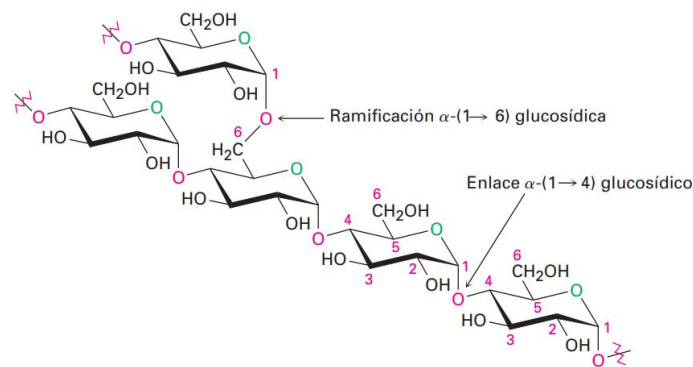


Figura 5. Estructura de la amilopectina (McMurry, 2012)

La amilopectina al entrar en contacto con el yodo da un color café rojizo y solo aproximadamente la mitad de la misma es convertida en malta por la β -amilasa; el residuo se conoce como dextrina (Fox y cols., 2006).

Estructura del gránulo de almidón

Morfología

En la naturaleza el almidón se encuentra en forma semi-cristalina, en entidades llamadas gránulos, los cuales pueden ser estudiados mediante microscopio electrónica de barrido (MEB), siendo este método el más utilizado ya que ha probado ser una herramienta efectiva para la caracterización morfológica del almidón. El mecanismo de esta técnica es someter al almidón a microscopía de luz polarizada, en donde mostraran un patrón de birrefringencia mejor conocida como Cruz de Malta, la presencia de este indica un alto orden dentro del gránulo.

La difracción de rayos X se utiliza para examinar la naturaleza cristalina de los gránulos de almidón y para definir las cantidades relativas de las áreas amorfas y cristalinas dentro del gránulo (Fernández, 2018).

Estructura cristalina

Los almidones presentan estructuras semicristalino, que contiene entre 15 y 45% de cristalinidad, estas están relacionada porque determina las propiedades del almidón. La estructura cristalina consiste en cadenas de amilopectina en forma de doble hélice, en las cuales los átomos de la molécula (carbono e hidrogeno) se encuentran en posiciones fijas y ordenadas (Sánchez, 2020). La técnica para adquirir información acerca de la estructura cristalina de los gránulos de almidón es la difracción de rayos X (DRX), identificando cuatro tipos de patrones en almidones nativos el tipo A son almidones de cereales, B lo presentan los tubérculos, los granos el patrón tipo C y el tipo V en complejos amilosa – lipídico.

Existen dos tipos diferentes de cristales que pueden formarse con los agregados de las doble hélices de la amilopectina, estos son conocido como cristales polimórficos tipo A y B, aunque también existe el tipo C, el cual se considera una combinación entre los A y B.

La estructura cristalina del tipo A, tiene un empacamiento más denso, con 4 moléculas de agua por cada 12 residuos de glucosa, proporcionando una simetría monoclinica. Mientras que en el tipo B tiene una estructura más abierta al presentar 36 moléculas de agua por hélice, con un cristal tipo hexagonal.

Características estructurales

El gránulo de almidón esta constituido de múltiples niveles de organización estructural. La representación esquemática de la organización del gránulo se muestra en la figura 6, en donde se observa primero los gránulos de almidón por consiguiente el crecimiento de los anillos amorfos y cristalinos, los cuales crecen a partir del hilum, que es el centro del granulo (B), y a su vez los anillos semicristalinos se componen de lamelas amorfas y cristalinas alternadas (C).

Las lamelas amorfas contienen los puntos de ramificación que conectan las dobles hélices de la amilopectina y amilosa intercalada aleatoriamente, las lamelas cristalinas comprenden segmentos cortos y lineales de las cadenas ramificadas de la amilopectina (Gutiérrez, 2020)

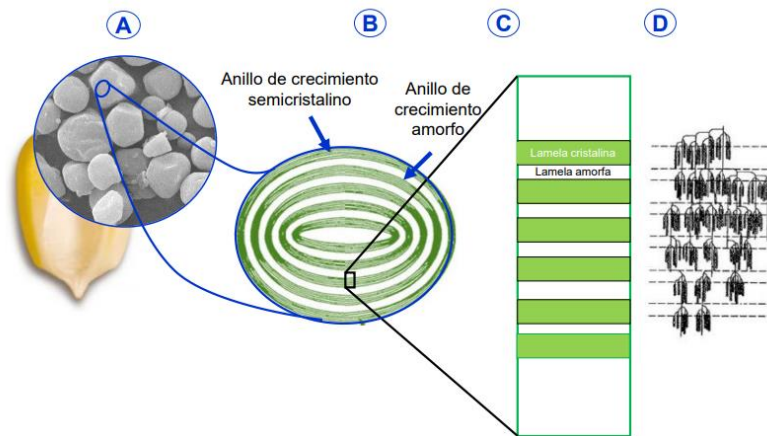


Figura 6. Representación esquemática de la estructura granular del almidón (Gutiérrez, 2020)

Uso de almidón en la industria alimentaria

Una de las propiedades más interesantes es evitar o favorecer la absorción de agua, haciendo que un alimento espese al momento de ser calentado o agitado, sin embargo, no todos los almidones funcionan de la misma manera. Los gránulos de almidón más pequeños tienen un área superficial, poros y canales más grandes que mejoran la absorción de agua.

Por otro lado, se ha realizado investigaciones que implican una modificación de las propiedades del almidón mediante procedimientos de oxidación, entrecruzamiento, entre otro.

La aplicación del almidón no solo se reduce a la industria alimentaria, sino que también se emplea en farmacéuticas, tintas, cosméticos, industria textil, entre otro; haciendo la función aglutinante, ligante, texturizante y como agente de dispersión (Mejía, y cols., 2021). También en los últimos años se está utilizando para atacar una de las problemáticas que hoy en día es una preocupación para el planeta: los plásticos (Castillo y cols., 2022).

La aplicación del almidón como material bioplástico requiere principalmente la transformación de la estructura semicristalina en una matriz homogénea amorfa, de esta forma se obtiene un material manejable que permite el moldeo de una película o recubrimiento (León, 2018).

Los potenciales usos del almidón son amplios, sin embargo, ha sido la industria alimentaria la que ha desarrollado más aplicaciones ya que es utilizado para mejorar la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento refrigerado, también es utilizado como espesante, estabilizador coloidal y agente gelificante por lo cual se adicionan a salsas, bebidas, embutidos y alimentos fermentados (Villarreal y cols., 2018).

HIPÓTESIS

La oxidación y acetilación del almidón de paterna mejora sus propiedades mecánicas y estructurales y le confieren un mayor potencial de uso en la industria alimenticia.

METODOLOGÍA

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo experimental de laboratorio y de análisis cuantitativo aplicado, debido a que se basa en los conocimientos previamente adquiridos y a la vez se genera más conocimiento, los cuales nos dan un resultado de forma rigurosa, organizada y sistemática.

El objetivo de este método es aportar conocimiento en un área específica, porque es sistemático, explícito y reproducible para identificar, evaluar y sintetizar el cuerpo existente del trabajo ejecutado y difundido, que generan los investigadores, los académicos, los profesionales y las organizaciones.

SITIO EXPERIMENTAL

El presente trabajo se llevó a cabo en los laboratorios de análisis de alimentos de la Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos, en el laboratorio de Materiales y Procesos Sustentables del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y en la Sección de electrónica de estado sólido del CINVESTAV Zacatenco.

MATERIAL BIOLÓGICO

Se seleccionaron 15 kg de semillas de paterna provenientes del municipio de Acacoyagua, Chiapas.

Aislamiento de almidón a partir de la semilla de *Inga jinicuil*.

Los almidones se aislaron utilizando el método descrito por Vargas y cols., (2016) con algunas modificaciones. Las vainas de paterna se lavaron, separaron y se obtuvieron las semillas. Las semillas se lavaron para eliminar cualquier rastro de pulpa adherida, y se molieron en una licuadora industrial. La suspensión obtenida se filtró a través de la malla estándar ASTM no. 270 (53 μm). El material drenado se lavó con agua destilada, y la suspensión filtrada se dejó en reposo durante 12 h a 4°C, este proceso se realizó dos veces. El agua se eliminó por decantación y la

capa de almidón sedimentada se resuspendió en agua destilada y se centrifugó a 6000 rpm durante 10 minutos. La capa de fibra y otros componentes fue desechada con una espátula y el almidón se resuspendió en agua destilada para ser centrifugado nuevamente, este paso se realizó entre tres y cuatro veces. Finalmente, el almidón fue secado en una estufa a 50°C durante 24 horas.

PROCESO

Descripción de reactivos y equipos

Equipos:

- Balanza analítica (VE-204 VELAB® México)
- Balanza granataria (Triple Brazo™ Serie 700 OHAUS México)
- Parrilla de calentamiento (HP-A1915B SYBRON® USA y Thermo Scientific™ CIMAREC USA)
- Centrífuga (Combo V24 LW Scientific® USA)
- Horno de secado (TE-ERLAB® México)
- Potenciómetro (HI 5521 pH edge™ HANNA Colombia)
- Termómetro (CA25 5QE BRANNA® Inglaterra)
- Termo balanza (292A Felisa® México)
- MEB (Hitachi® S-5500)
- Difractómetro (Rigaku® Ultima IV)

Materiales:

- Vasos de precipitado de 600 ml
- Cajas Petri
- Tubos de centrifuga de 50 ml y 15 ml
- Probeta de 100 ml
- Pipetas de 5 ml
- Embudo de cristal
- Tamizador con malla no. 100 u.s
- Espátula chica

Reactivos:

- Hidróxido de sodio
- Anhídrido acético
- Hipoclorito de sodio
- Ácido sulfúrico
- Soluciones para calibración de pH

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrolló como se presenta en la figura 7.

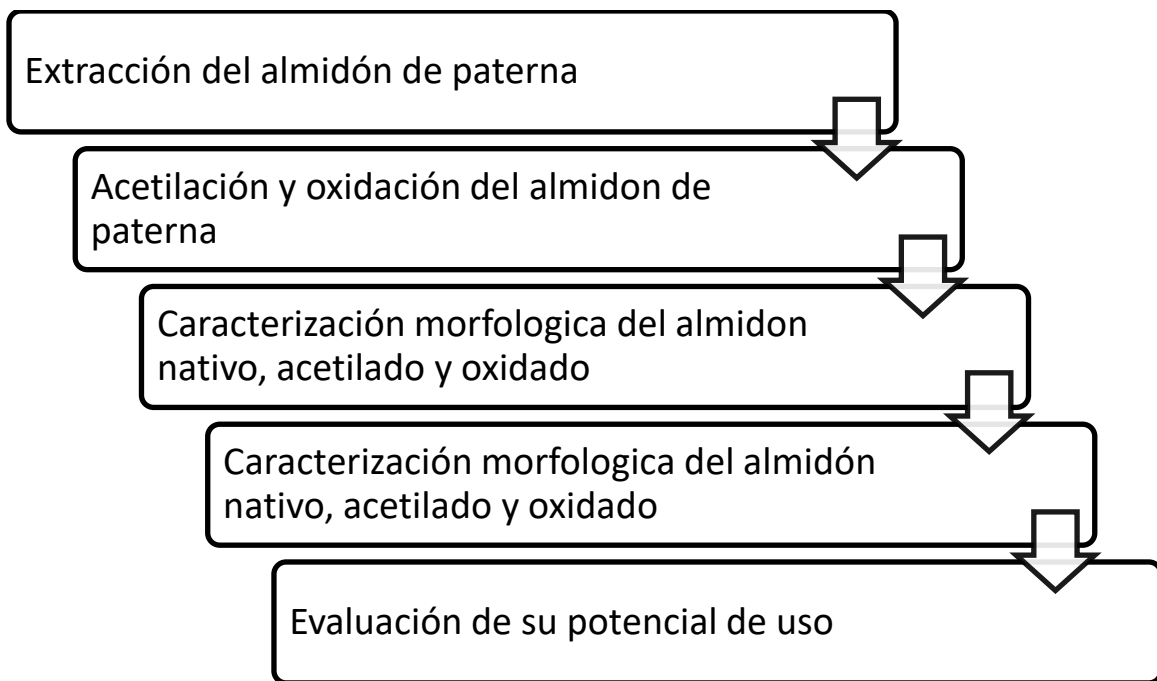


Figura 7. Diagrama de flujo del desarrollo de las etapas de la investigación

DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS

Acetilación de almidón

El método utilizado fue de Phillips y *cols.*, (1999), en donde se colocó el almidón nativo en un matraz de tres bocas con agua destilada, la mezcla se mantuvo bajo agitación durante 60 min a 25°C, el pH de la suspensión se ajustó a 8.0 con NaOH al 3%, posteriormente se agregó anhídrido acético gota a gota en la dispersión de almidón bajo agitación, manteniendo un rango de pH de 9.5. Después de completar la adición de anhídrido acético, la reacción se mantuvo por 30 minutos. Se centrifugo por 10 minutos a 10,500 g, se resuspendido en agua destilada y se centrifugo nuevamente repitiendo este paso tres veces; se lavó con etanol del 96% y se centrifugó 10 minutos, finalmente el almidón fue secado a 40°C por 24 horas.

Oxidación de almidón

El almidón nativo se sometió a un proceso de oxidación con hipoclorito de sodio (NaClO) a diferentes concentraciones de cloro activo, utilizando el procedimiento reportado por Wang y Wang (2003) con ligeras modificaciones. Se preparó una pasta de almidón al 40% de sólidos, adicionando agua destilada a 200 g de almidón para obtener un peso final de 500 g. La mezcla de almidón-agua, se puso en agitación constante, se llevó a una temperatura de 35 °C y se ajustó el pH a 9.5 con NaOH 2N, después, se adicionaron 100 ml de hipoclorito de sodio al 0.25 % de cloro activo p/v en un tiempo de 30 minutos, manteniendo el pH de 9.5 con H₂SO₄ 1N. posteriormente, se dio un tiempo de reacción de 50 minutos adicionales, manteniendo el pH de 9.5 con NaOH 1 N, para neutralizar las sustancias ácidas liberadas; finalmente, el pH se neutralizó (pH 7) con H₂SO₄ 1N, se adicionó agua destilada y se esperó la sedimentación del almidón, para iniciar el proceso de lavado. Una vez precipitado el almidón oxidado, se eliminó la mezcla de reacción; se adicionó más agua destilada, se agitó con una espátula, se dio tiempo para la sedimentación y se eliminó la fase acuosa por decantación; los lavados se realizaron hasta observar el agua cristalina. Los almidones oxidados, se secaron en una estufa (50-55 °C) por 48 horas; se molieron y se tamizaron en malla no. 100 u.s. (0.15 mm Ø) para homogenizar el tamaño de partícula

Determinación de Humedad del almidón de paterna

El % de humedad del almidón de paterna se determinó de acuerdo al método 934.01 de la AOAC. Utilizando un equipo de termo balanza marca: Felisa modelo: 292A.

Técnicas de caracterización

La caracterización se refiere a la obtención de información detallada sobre la disposición espacial de los átomos que integran un material, además de conocer la naturaleza atómica de los elementos presentes. Una caracterización abarca la medición del mayor número de propiedades físicas y químicas, identificar imperfecciones, defectos, impurezas, etc. Dicha caracterización se logra a partir de la interacción de algún tipo de señal (fotones, electrones, fuerzas electrostáticas, etc.) con la superficie del material; esta perturbación o agresión nos permite conocer o predecir las propiedades de un material y así valorar su utilidad en diversas aplicaciones.

Difracción de rayos X (DRX).

La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia entre los planos de la red cristalina y θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión. La difracción de rayos en una muestra policristalina permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difracto grama característica) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Otras aplicaciones son el análisis cuantitativo de compuestos cristalinos, la determinación de tamaños de cristales, la determinación del

coeficiente de dilatación térmica, así como cálculos sobre la simetría del cristal y en especial la asignación de distancias a determinadas familias de planos y la obtención de los parámetros de la red.

La difracción de rayos-X es un método de alta tecnología no destructivo para el análisis de una amplia gama de materiales, incluyendo fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos delgados, cerámicas y semiconductores. La aplicación fundamental de la Difracción de Rayos X es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina.

Esta técnica es importante en el proyecto, ya que es necesario determinar la estructura cristalina de todos los almidones que se obtengan para observar si existe un cambio en la orientación cristalográfica de las muestras cuando alguno de los parámetros de síntesis es modificados.

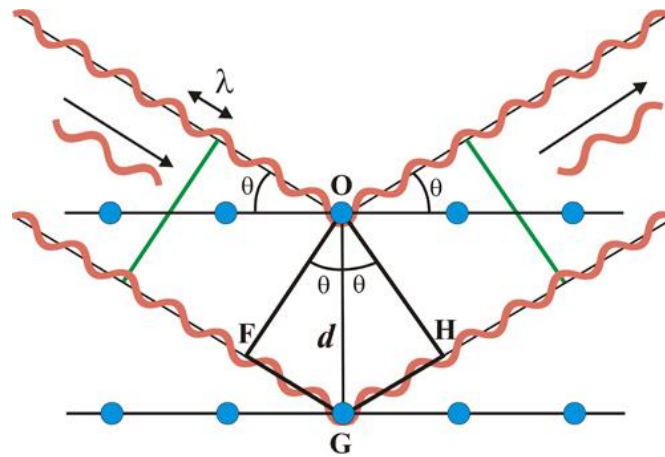


Figura 8. Interacción de los rayos-X sobre átomos ordenados (Siemion, 2004).

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

La técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) se utiliza para el análisis de superficies de muestras, el tamaño y la forma de las nanopartículas magnéticas. Esta técnica puede producir imágenes de objetos tridimensionales, en el modo normal de funcionamiento, registra los electrones secundarios emitidos por la muestra por el haz de electrones que incide sobre ella, en lugar de los electrones que fluyen a través de ella.

Scanning Electron Microscope

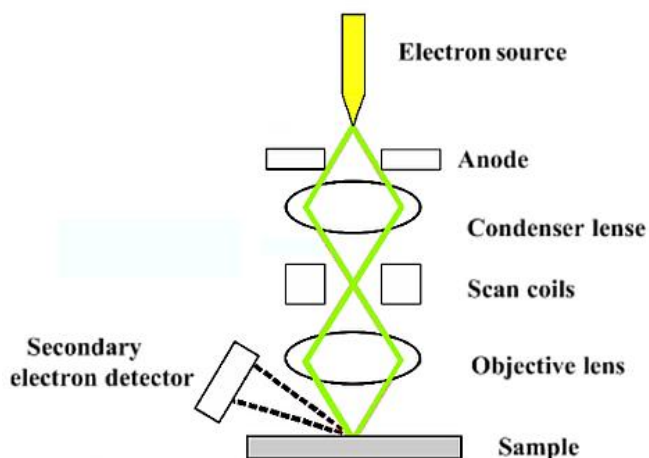


Figura 9. Diagrama de los componentes del microscopio MEB (Lin, 2021).

El microscopio MEB incluye el cañón de electrones (fuente de electrones y ánodo de aceleración), lentes electromagnéticas para enfocar los electrones, cámara de vacío que alberga la plataforma de la muestra y una sección de detectores para recolectar las señales emitidas por el espécimen (Figura 9) (Fan, 2012).

Condiciones de medición

Difracción de Rayos-X (DRX).

El análisis estructural de los almidones se hizo mediante difracción de rayos X. Los difractogramas de las películas se registraron utilizando un difractómetro Rigaku Ultima IV con radiación $\text{Cu K}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$ ajustada a 40 kV y 40 mA. Las mediciones se realizaron en un rango de $2\theta / \Theta$ de 10° a 50° con una velocidad de exploración de $0.2^\circ/\text{min}^\circ$.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

La morfología de la superficie de los almidones se estudió mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo usando un Hitachi S-5500 operado a 1 Kv una corriente $13700 \mu\text{A}$. Las muestras fueron observadas a diversas magnificaciones.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un factor de confiabilidad del 95%. Los análisis fueron realizados por triplicado reportando los resultados con una desviación estándar utilizando el software Minitab.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Modificación del almidón nativo de paterna

La acetilación es una modificación química de la estructura del almidón que consiste en reemplazar un determinado número de grupo hidroxilos por grupos acetilos empleando anhídrido acético (Martínez y cols., 2019). Se usó la metodología indicada para el proceso de acetilación al 5%. Al realizar este procedimiento es muy probable no mantener el peso inicial del almidón, en la figura 10 se presenta la perdida de almidón en el proceso de acetilado.

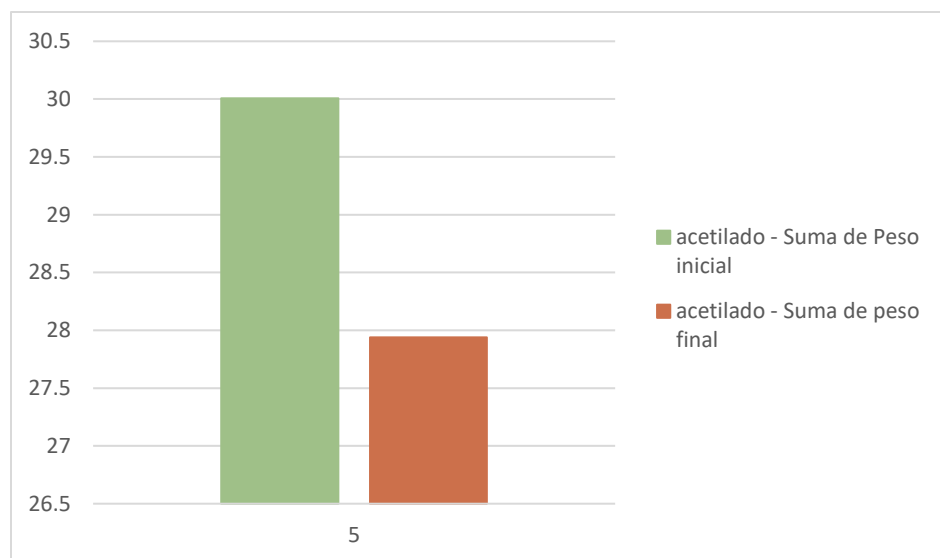


Figura 10. Pérdida de peso del almidón en el proceso de acetilación.

De acuerdo a la literatura el almidón acetilado tiene una alta retención de agua que ingresa al gránulo, por lo que favorece la gelatinización y es una buena opción a utilizar en la industria de alimentos.

La oxidación del almidón implica la introducción de grupos carbonilo y grupos carboxilos en las unidades de glucosa, dentro de la matriz del polímero. Los grupos hidroxilos en las moléculas de almidón son oxidados primero a grupos carbonilo y luego a grupos carboxilos, y su número

indica el nivel de oxidación (Rincón y cols., 2007). Según estudios han mostrado que esta modificación blanquea el almidón y disminuye la retrogradación.

Algunas de las propiedades que se presenta en la literatura es la mejora en sus propiedades barrera al vapor de agua, limitando la capacidad de adsorción de agua por parte de la película, así como la mejora en propiedades mecánicas.

Para realizar la modificación se implementó la metodología descrita anteriormente en la cual consiste en agregar hipoclorito de sodio al almidón para obtener la oxidación, en este caso la pérdida fue mínima aproximadamente 2 g.

A los almidones se les determinó el porcentaje de humedad, la prueba se realizó por duplicado, obteniendo los siguientes resultados obtenidos por el ANOVA ($p > 0.05$) se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de contenido de humedad en los almidones

Tratamiento	Contenido humedad %
Nativo	7.6354±0.0718
Acetilado 5%	15.6693±0.0079
Oxidado 5%	7.7739±0.0687

En los datos presentado en la tabla 8 se observa que el porcentaje de humedad en los almidones es de 7 al 15%, Alvis y cols., (2008) reportaron el contenido de humedad en almidones de ñame entre el 8.66 a 10.22%, yuca entre 7.80 a 8.47% y papa 8.50%.

La paterna se le considera como una especie de leguminosa, al ser un fruto con poco uso es complicado encontrar información concreta, por lo que los análisis serán comprados con una especie de leguminosa similar, como es el chachafruto también conocido como balú. De acuerdo a un estudio realizado por Quintero y cols., (2013) el porcentaje de humedad en el almidón de chachafruto es de 12.60%, por lo cual podemos resaltar que los porcentajes obtenidos del almidón de la paterna se encuentran del rango, a excepción del almidón acetilado al 5%, el cual sobrepasa el 12%.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

En la siguiente imagen se muestran las microfotografías obtenidas para el almidón control, el almidón de paterna nativo, el oxidado al 5% y el acetilado al 5%.

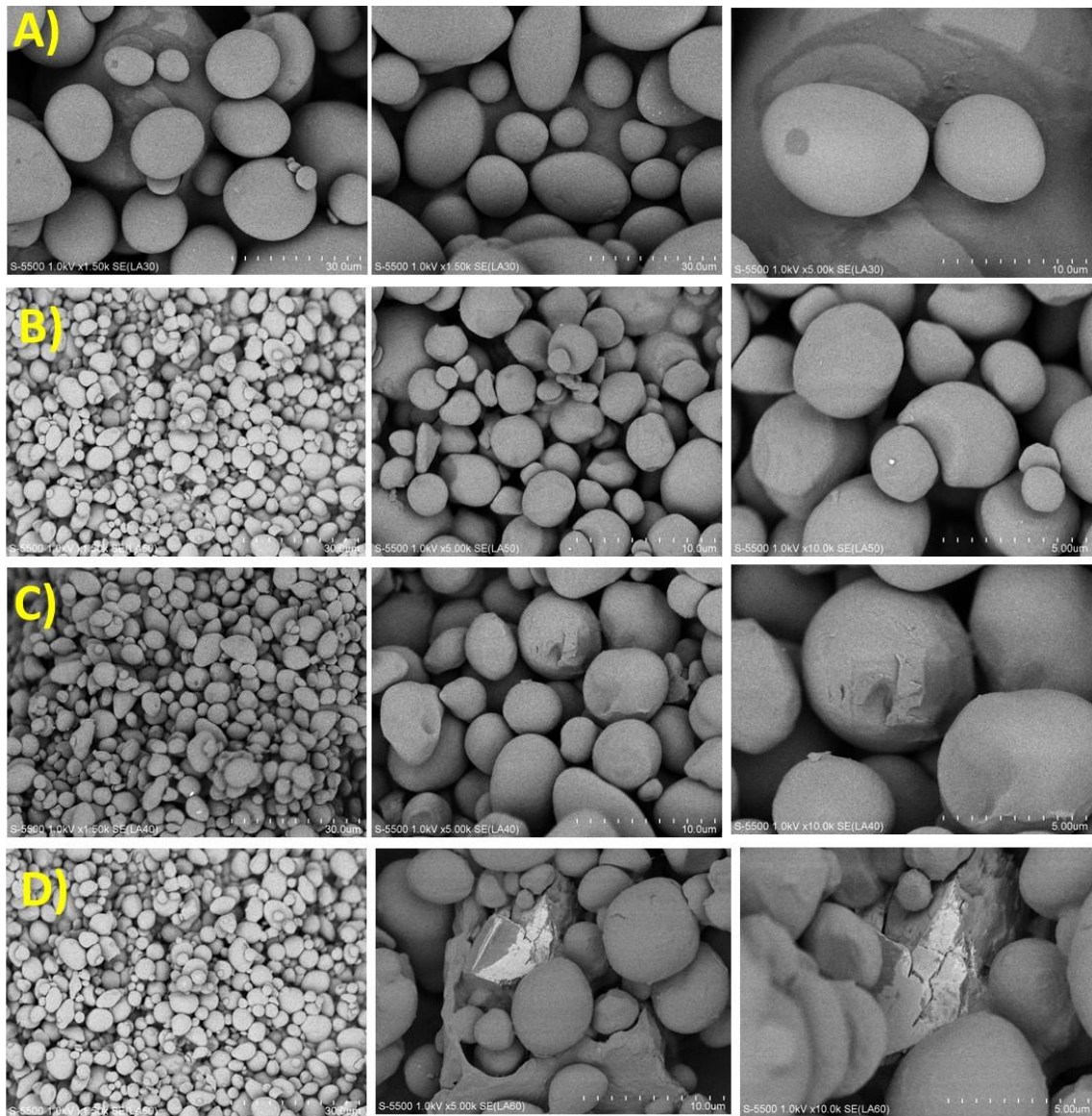


Figura 11. Micrografías de las muestras a) almidón control b) Nativo paterna c) Oxidado al 5 % y d) Acetilado al 5 %.

La Figura 11a, muestra las micrografías obtenidas para el almidón control marca Sigma, esta técnica permitió identificar el tipo de almidón a partir del tamaño y forma del granulo, los gránulos de almidón control poseen formas irregulares, ovalados y superficies lisas similar a los almidones de papa , morfologías similares se aprecian en el trabajo de Siemion et al (2004) y Jia Lin Liu et al (2021), con diámetros entre las 15 a 90 micras medidas en el software ImageJ .En la figura 11b, se observan las micrografías del almidón de paterna, morfológicamente todos los gránulos de almidón fueron similares en forma, tamaño y superficie con una tamaño que varía entre los 2 hasta los 6 micras de apariencia esférica, estas morfologías fueron consistentes con los hallazgos para los almidones de cebada reportados por Z.B (2010). En las figuras C y D se presentan los almidones oxidados y acetilados respectivamente, no se observaron cambios significativos en la morfología de la superficie de los gránulos entre los tratamientos, sin embargo, se observa para los gránulos de los almidones acetilados, fisuras, algunos bordes perdieron definición por fracturación de los mismos, estudios como el de Jia-Lin Liu et al (2021), relacionan estas rupturas al contenido de humedad de la muestra, los tamaños de gránulos oscilan entre los 2 a 7 micras en ambos casos. El tamaño y forma de los gránulos depende de la estructura de la amilopectina. Los gránulos alargados tienen amilopectina con pocas ramificaciones, pero largas, y gránulos pequeños y esféricos presentan mayor número de ramificaciones y son de cadenas cortas. Además, esta característica repercute en algunas propiedades fisicoquímicas, funcionales y nutricionales. Los gránulos grandes pueden generar viscosidad alta de pasta y los pequeños mayor digestibilidad (Casarrubias, 2012).

En la figura 11a, podemos observar las mediciones a los gránulos de almidón, en el caso de los gránulos de almidón control presentaron un tamaño promedio de $17\mu\text{m}$ característicos para un almidón de papa, en el caso del almidón de paterna, el tamaño promedio de su granulo es de $5.26\mu\text{m}$, con formas esféricas con superficies suaves y lisas, el tamaño observado es pequeño, comparado con el control. En el caso del granulo del almidón oxidado, el promedio es de $3.8\mu\text{m}$ y el acetilado es de $6.97\mu\text{m}$, siendo estos últimos los más grandes. El aumento en el tamaño se debe a la introducción de los grupos acetilos a las cadenas de almidón.

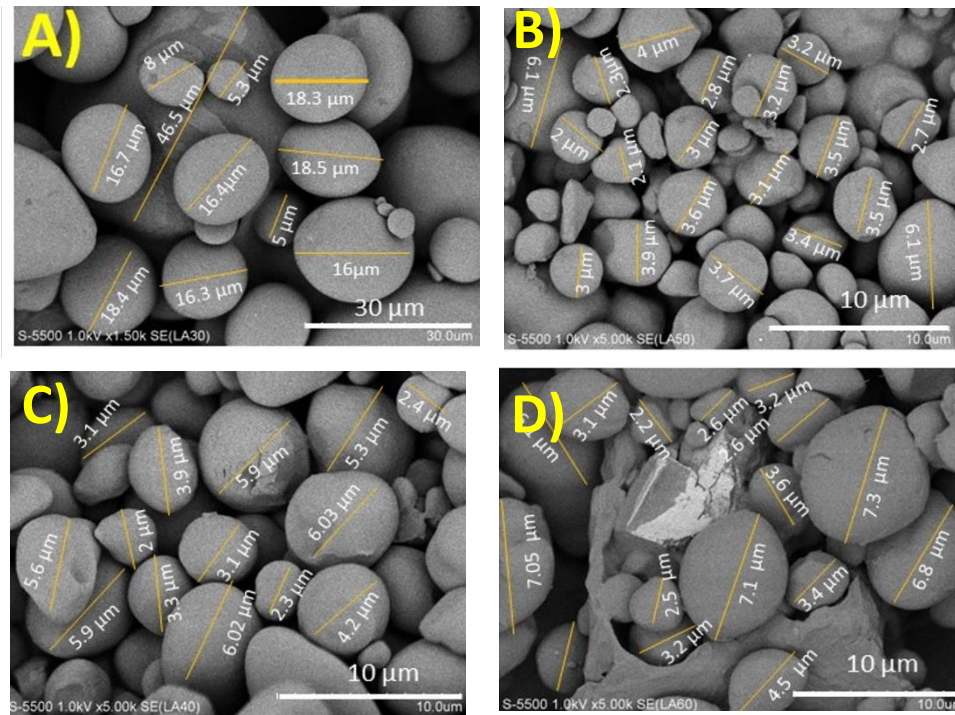


Figura 12a. Tamaño del granulo de almidón de las muestras a) almidón control b) Nativo paterna c) Oxidado al 5 % y d) Acetilado al 5 %.

Análisis de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier

En la Figura 12 se muestra la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier del almidón control, nativo, oxidado y acetilado al 5 %.

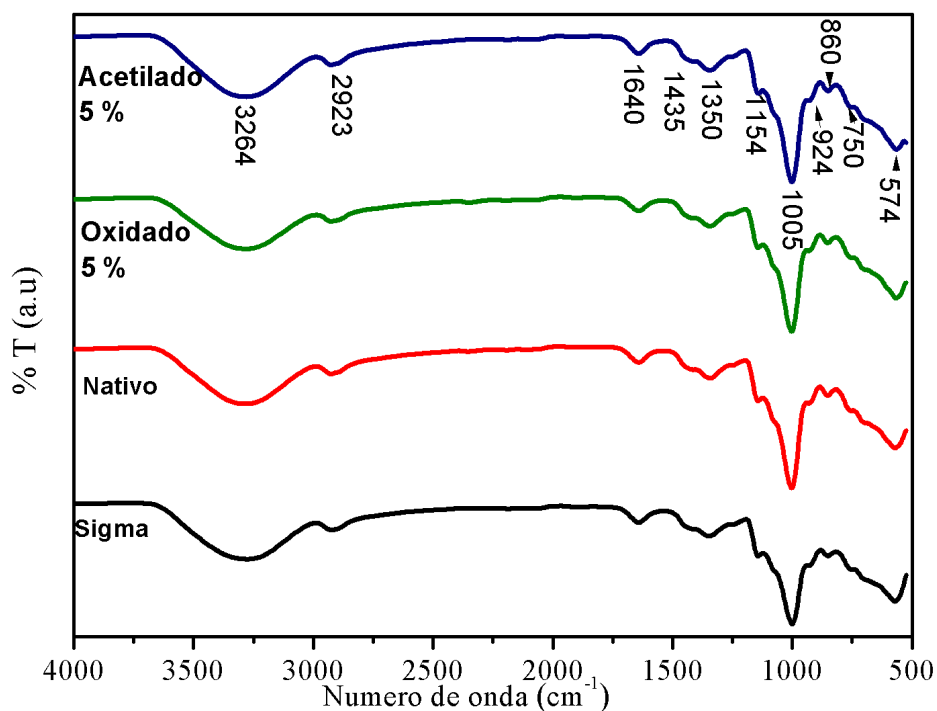


Figura 13. Diferencias de intensidad del espectro FTIR para muestras de almidón control, nativo, oxidado al 5 % y acetilado al 5 %.

Las señales de absorción característicos en 3392.3–3416.2 cm^{-1} son atribuido a la vibración del estiramiento O-H debido a los grupos hidroxilo unidos por hidrógeno presentes en la molécula de almidón (Brij, 2017), la señal observada de 2923 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilo, respectivamente. La absorbancia en 1638.9–1640 cm^{-1} se atribuye a la vibración de flexión de O-H del agua absorbida en las regiones amorfas del almidón (Mina et al, 2011). Se observan señales a números de onda de 1435,1350 cm^{-1} que han sido asignadas a la vibración antisimétrica /simétrica de los grupos CH_3 y las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo (C-O), respectivamente. Las señales a 924,860,750,574 cm^{-1} se debe a las vibraciones de estiramiento del anillo de anhidro glucosa (Torres et al, 2015) y la banda a 1000 cm^{-1} se atribuyó a la vibración de estiramiento de C–O en C–O–C (Hanaffi, 2012).

Cuando se produce la reacción de acetilación en la molécula de almidón, se observa una disminución en las señales que corresponden a vibraciones por estiramiento (3000-3500 cm^{-1}) y vibraciones por flexión (1005 cm^{-1}) de los grupos OH (más notable en esta última vibración).

Esto es debido a la introducción de grupos acetilo en el almidón, que propician un cierto efecto estérico a las vibraciones por flexión, corroborando que la acetilación se efectuó en las muestras analizadas.

Difracción de rayos X

En la Figura 13, se muestran los resultados obtenidos de la difracción de rayos X para el almidón control, nativo, oxidado y acetilado al 5 %.

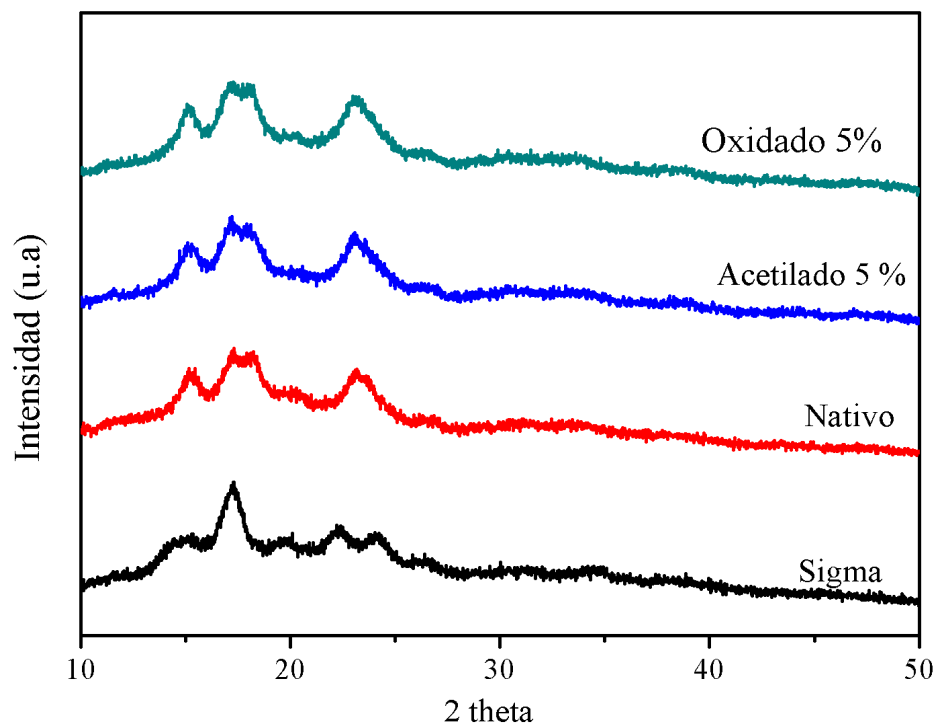


Figura 14. Patrones de difracción de almidón control, nativo, acetilado y oxidado al 5 %.

El almidón fue colocado en el portamuestra del difractómetro de rayos X (Ultima IV Rigaku) equipado con una fuente de cobre operado a 40 KV de voltaje y 44 mA de corriente, produciendo una radiación de $\text{CuK}\alpha$ con una longitud de onda de 1.54 \AA . Los datos se recolectaron en un rango de $10\text{-}50^\circ$ a intervalos de 0.1° con una velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$. La recristalización de las películas de almidón puede ser monitoreada por difracción de rayos X, observando el cambio de cristalinidad en su estructura. Al ser este un material semicristalino, su

espectro de difracción de rayos X posee picos de difracción y una zona amorfa, cuanto mayor sea esta zona, menor es el grado de cristalinidad de la muestra (Rojas, s.f).

La región cristalina consta de dobles hélices de amilopectina, mientras que la región amorfa está formada por cadenas de amilosa y segmentos ramificados de amilopectina. Las cadenas de amilosa se entremezclan con cadenas de amilopectina. La morfología, forma, tamaño, grado de cristalinidad y reactividad del almidón dependen del origen y la composición de la materia prima que contiene almidón (Liu, 2016).

Estudios de Jenkins y Donald (1995), demostraron que las láminas cristalinas de amilopectina en almidón presentan tres patrones cristalinos diferentes, estos patrones vinculan la cristalinidad y la longitud de las cadenas de amilopectina que forman los grupos, las muestras con cadenas cortas de amilopectina están asociados a un patrón de difracción tipo A, las muestras de cadena larga están indexados a un patrón tipo B y las cadenas intermediarias al tipo C. Los patrones cristalinos tipos A y B se pueden interpretar con simetría hexagonal debido al empaquetamiento de doble hélice hidratada de la amilopectina (Dios-Avila, s.f).

Los patrones de difracción de rayos X en polvo para los almidones se presentan en la Fig. 13., para la muestra control se puede observar un patrón cristalino similar para almidones de papa obtenidos por Guinesi et al (2006), que son típicos de los almidones tipo B, con picos de difracción en $2\theta=15^\circ, 17.23^\circ, 19^\circ, 22.37^\circ$ y 24.13° .

Los gránulos de almidón nativo exhiben dos tipos principales de estructura, el tipo B observándose picos que difractan en los ángulos $2\theta = 15.31, 20.32$ y 23.22 y un doble pico en 17.22 y 18.31 que corresponde a la estructura tipo C (Dome, 2020), esta estructura cristalina de tipo C es característica del almidón extraído de leguminosas o raíces de plantas. La porción cristalina del almidón está formada por seis hélices dobles de hebras paralelas levógiras empaquetadas en una celda unitaria hexagonal relativamente poco empaquetada. Se observa en la muestra acetilada una pérdida de cristalinidad ya que presenta un ensanchamiento en los picos (Chi, 2008).

El nivel de cristalinidad puede ser importante cuando los productos con almidón son almacenados, ya que durante el almacenamiento hay retrogradación del almidón, que modifica las propiedades de textura y nutricionales de los productos. Los almidones de maíz con mayor cristalinidad pueden retrogradar (reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina a un

estado cristalino) a mayor velocidad o producir estructuras más resistentes a la hidrólisis por las enzimas digestivas (Agama, 2005).

CONCLUSIONES

En esta investigación el almidón se obtuvo de la paterna, fruta endémica del sur de México, de la cual no hay muchas investigaciones.

Se comprobó que el almidón de esta fruta tiene capacidad para utilizarse como aditivo en la industria alimentaria, su tamaño de granulo es pequeño, de forma esférica, al realizar modificaciones en este, se agregaron algunas características que podrían impulsar su uso, como menor temperatura de gelatinización (T_g), mayores picos de viscosidad máxima con respecto al nativo, mayor capacidad de dispersión y también incremento en la claridad y estabilidad de los geles y reduce la retrogradación. Probablemente pueda utilizarse para formar recubrimientos flexibles y transparentes.

REFERENCIAS DOCUMENTALES

A. Nanakoudis, «ThermoFisher SCIENTIFIC,» 14 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/what-is-sem-scanning-electron-microscopy-explained/>. [Último acceso: 23 Septiembre 2022].

ALEGRÍA SALMERÓN, Claudia Verónica y RIVERA ROSALES, Juan Raúl. *Estudio gastronómico y nutricional de frutas y hortalizas salvadoreñas*. [en línea] Trabajo de titulación (Ingeniería en alimentos). Universidad Dr. José Matías Delgado. S.f Disponible: https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECAVIRTUAL/TESIS/04/IAL/AD_TESOE0001294.pdf [consulta: 06 junio 2022]

ALVIS, Armando; VÉLEZ, Carlos A.; VILLADA, Héctor S. y RADA MENDOZA, Maite. Análisis fisicoquímico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas. En: *información tecnológica* [en línea] 2008, vol.19, no. 1. P.p 19-28. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642008000100004&script=sci_abstract [consulta: 02 junio 2022]

ANCHUNDIA, Miguel. Caracterización funcional de almidón acetilado de camote y su utilización en la formulación de pudines de frutas. En: Sathiti, sembrador [en línea] 2019 14(1).2 019 160-173. <https://doi.org/10.32645/13906925.813>

ARGUETA MIRANDA, Milagro de la Paz. Elaboración y caracterización de una biopelícula a partir de almidón de plátano verde (*Musa paradisiaca*) incorporando aceite esencial de orégano (*Origanum sp*) como inhibidor microbiano en la preservación de fresas empacadas. [en línea] Trabajo de titulación (Ingeniera de alimentos). Universidad de el salvador. 2019. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/24932> [consulta: 28 marzo 2022]

B. Inkson, Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, ELSEVIER, 2016.

CALAFELL CARRERA, Daileny. *Propuesta de tecnologías para la acetilación del almidón de yuca*. [en línea] Trabajo de diploma. Universidad Central “Marta Abreu” de las villas. Disponible en: [Calafell Carrera, Daileny.pdf \(uclv.edu.cu\)](http://CalafellCarrera,Daileny.pdf(uclv.edu.cu)) [consulta: 18 noviembre 2022]

CASTELO GARCÍA, Adriana Guadalupe. *Caracterización de películas de almidón de papa, maíz y amaranto tratadas con plasma frío*. [En línea] Trabajo de maestría (Maestría en tecnología avanzada).

Querétaro: Instituto Politécnico Nacional. 2018. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24376> [Consulta: 26 agosto 2021]

CASTILLO, Angélica; MARTÍNEZ, Harol; GÓMEZ, Omar; POSADA, Camila; LONDOÑO, Sandra M. y RODRÍGUEZ, Mario E. El don del almidón: la partícula espesante. [en línea] En: *Ciencia UNAM*. 2022. Disponible en: [El don del almidón: la partícula espesante - Ciencia UNAM](#) [consulta: 17 noviembre 2022]

Cristalografía, [En línea]. Available: https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_05_5.html. [Último acceso: 2022 Septiembre 23]

CUENCA, Pamela Soledad. *Desarrollo de recubrimiento activo basado en almidón/Dacetato de almidón para preservar la calidad de alimentos regionales.* [en línea] Trabajo de Doctorado (Doctor en ciencias aplicadas). Posada: Universidad Nacional de Misiones. 2020. [consulta: 05 junio 2022] disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12219/2579>

FERNÁNDEZ OCEGUEDA, Yoel. *Obtención de almidón resistente tipo III a partir de una modificación dual del almidón de malanga (colocasia esculenta Schott) y plátano (Musa paradisiaca L.): caracterización de digestibilidad, propiedades térmicas y molecular.* [en línea] Trabajo de titulación (Maestro en Biotecnología): Universidad del Papaloapan. 2018. Disponible en: MB24-Yoel_Fernández_Ocegueda.pdf (unpa.edu.mx) [Consulta: 17 noviembre

FERNÁNDEZ-GÓMEZ, P; PRIETO, M; FERNÁNDEZ-ESCÁMEZ, P. S; LÓPEZ, M; y ALVAREZ-ORDÓÑEZ, A. Biopelículas y persistencia microbiana en la industria alimentaria. *Arbor*, 196(795), a538. 2020. <https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795n1002>

FOX, Brian y CAMERON, Allan. *Ciencia de los alimentos, nutrición y salud.* México. Editorial Limusa, 2006. P.p 122 - 124 ISBN 968-18-4257-X

G. M.-M. S. L. R.-A. M. S.-R. L. A. B.-P. M. Guadalupe Casarrubias-Castillo, «STRUCTURAL AND RHEOLOGICAL DIFFERENCES BETWEEN FRUIT AND CEREAL STARCHES,» *Agrociencia*, vol. 46, pp. 455-466, 2012.

GUTIÉRREZ MONTIEL, Edith. *Modificación dual almidón de yuca: oxidación-esterificación, y termoplastificación, para la compatibilización con PLA.* [en línea] Trabajo de titulación (Maestría en tecnología de polímeros): Centro de Investigación en química aplicada. 2020. Disponible en: <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/644>

J. J. K. J. K. Przemyslaw Siemion, «Solid State Reactions of Potato Starch with Urea and Biuret,» *Journal of Environmental Polymer Degradation*, vol. 12(4), pp. 247-255, 2004.

J. Z. b. d. s. y. I. B. G. R. X. Fanático de Xiangyun, «Comparison of pasting properties measured from the whole grain flour and extracted starch in barley (*Hordeum vulgare* L.),» *PLoS ONE*, vol. 14, n° 5, 2010.

LEÓN MÉNDEZ, Glicerio; LEÓN MÉNDEZ, Deisy; MONROY ARELLANO, Mitzy R; DE LA ESPRIELLA ANGARITA, StepHanie y HERRERA BARROS, Adriana. Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial en la industria cosmética. [en línea] *Revista Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*. Vol. 39, no. 5. 2020. Disponible en: [10.5281/zenodo.4263410](https://zenodo.org/record/4263410) [consulta 29 marzo 2022]

MARTINEZ, Patricia; PEÑA, Fiorela; GOMÉZ, Yelena; VARGAS, Guino y VELEZMORO, Carmen. Propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (*Solanum tuberosum*) var. 'única'. *Rev. Soc. Quím. Perú* [online]. 2019, vol.85, n.3, pp.338-351. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810634X2019000300006&lng=es&nrm=iso. [consulta: 02 junio 2022]

MCMURRY, John. *Química orgánica*. 8ª edición. México D.F. 2012

MEJÍA ESPAÑA, Diego F.; LATORRE VÁSQUEZ, Laura I.; CHAVES MORILLO, Diana M.; TREJO ESCOBAR, Diego M. y VALENCIA FLOREZ, Luis F. Usos potenciales del almidón de papa. *Rev. Universidad de Nariño*. [en línea] 2021, vol. [Cartilla usos almidón de papa \(udenar.edu.co\)](#) ISBN: 978-958-5123-70-0 [Consulta: 17 noviembre 2022]

NIEMBRO ROCAS, Aníbal. *Inga jinicuil Schtdl. & cham. Ex G. don.* [en línea] CONABIO. 2009. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/42-legum23m.pdf [Consulta: 28 abril 2022]

OLIVERO VERBEL, Rafael Enrique; MIRANDA HERNANDEZ, Dubán Felipe y FLORES VERGARA, Alexy. Recubrimiento a base de almidón de yuca modificado para disminuir el efecto de maduración del níspero. *Editorial Universidad del Atlántico* [en línea] 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.15648/EUA.110> [consulta: 06 junio 2022]

ORTEGA RODRIGUEZ, Adriana Sofía. *Análisis proximal y evaluación de la actividad antioxidante de semillas de la especie inga densiflora Beth.* [en línea] Trabajo de titulación (Química de Alimentos): universidad central del Ecuador. 2020. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21956> [Consulta: 28 abril 2022]

P.-C. , a. L.-S. L. Jia-Lin Liu, «Impacts of Hydrothermal Treatments on the Morphology, Structural Characteristics, and In Vitro Digestibility of Water Caltrop Starch,» *Molecules*, vol. 26(16), pp. ,4974, 2021.

PHILLIPS, D. L., HUIJUN, L., Pan, D., HAROLD CORKE, H. 1999. General application of Raman spectroscopy for the determination of level of acetylation in modified starches. *Cereal Chemistry*

QUINCHE SALAZAR, Gabriela Sulay. *Aprovechamiento de la harina de pulpa y semilla de la guaba (inga edulis) en la elaboración de quimbolitos.* [en línea] Trabajo de titulación (Ingeniera agrícola) Universidad agraria del ecuador. 2021. Disponible en: [CIA - Centro de Información Agraria \(uagraria.edu.ec\)](http://uagraria.edu.ec) [Consulta: 28 abril 2022]

QUINTERO CASTAÑO, Víctor Dumar; LUCAS AGUIRRE, Juan Carlos y ÁLZATE CARVAJAL, Erika Natalia. Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto. *Revista de la facultad de ingeniería Genium*, [en línea] 2013, vol 12, no 28. P.p 16-32. Disponible en: <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/714> [consulta: 02 junio 2022]

RAMOS GARCÍA, Margarita de Lorena; ROMERO BASTIDA, Claudia y BAUTISTA BAÑOS, Silvia. Almidón modificado: propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas frescas. [en línea] *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha.* Vol. 19, no. 1. 2018. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81355612003> [consulta: 29 marzo 2022]

RINCON, Alicia Mariela; LIZET BOU RACHED, Luis E. y ARAGOZA, Fanny Padilla. Efecto de la acetilación y oxidación sobre algunas propiedades del almidón de semillas de Fruto de pan (*Artocarpus altilis*). *ALAN* [online]. 2007, vol.57, n.3 [citado 2022-06-03], pp.287-294. Disponible en: <http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222007000300012&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0004-0622.

SANCHEZ MENDOZA, Noemi A; JIMÉNEZ MARTÍNEZ, Cristian; CARDADOR MARTÍNEZ, Anaberta; MARTÍN DEL CAMPO, Barba Sandra y DÁVILA ORTIZ Gloria. Caracterización física, nutricional y no nutricional de las semillas de Inga paterno. *Rev. chil. nutr.* [online]. 2016, vol.43, n.4 [citado 2022-04-29], pp.400-407. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.pHp?script=sci_arttext&pid=S0717-

7518. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000400010>.

SANCHÉZ RIVERA, Jazmín. *Efecto de la modificación dual mediante molienda de bolas y entrecruzamiento sobre las propiedades del almidón de malanga (colocasia esculenta L.)* [en línea] Trabajo de titulación (Master en ciencia en ingeniería bioquímica): Tecnológico Nacional de México. 2020. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2529> [consulta: 17 noviembre 2022]

SANDKER, Marieke y TOTARO, Luigi. Árboles melíferos para reforestar. *Promabos*. 2005.

SILVA, E.M; SOUZA, J.N; ROGEZ, H. REES, J.F y LARONDELLE, Y. Antioxidant activities and polyphenolic contents of fifteen selected plants species from the Amazonian región. *Revista: Elsevier*. [en línea] Vol. 101, issue 3, 2007, p.p 1012 – 1018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.055> [consulta: 10 agosto 2022]

SMITH, R. J. (1967). Production and use of hypochlorite oxidized starches. In *Starch chemistry and technology*, R.L.Whistler, & E.F. Paschall (Eds.), New York: Academic Press, Vol II; pp. 620-625.

VARGAS CORDERO, Zoila Rosa. LA INVESTIGACIÓN APLICADA: UNA FORMA DE CONOCER LAS REALIDADES CON EVIDENCIA CIENTÍFICA. *Revista Educación* [en línea]., 33 (1), 155-165. 2009. ISSN: 0379-7082. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44015082010> [Consulta: 25 noviembre 2021]

VILLARROEL, Pía; GOMEZ, Camila; VERA, Camila y TORRES, Jairo. Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Rev. chil. nutr.* [en línea]. 2018, vol.45, n.3, pp.271-278. ISSN 0717-7518 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>. [consulta: 16 noviembre 2022]

WANG, Y. and WANG, L. (2003). PHysicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. *Carbohydrate Polymers*. 52: 207-217