

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“EFECTO DEL CALOR SECO EN LA ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONALIDAD DE ALMIDÓN DE SORGO”

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

ANA SOFÍA DE ALBA RUIZ

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN GUADALUPE SOLER MARTÍNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, JUNIO, 2026.

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

"EFECTO DEL CALOR SECO EN LA ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONALIDAD DE ALMIDÓN DE SORGO"

PROTOCOLO DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

ANA SOFÍA DE ALBA RUIZ

DIRIGIDA POR

Dr. ADRIÁN GUADALUPE SOLER MARTÍNEZ

SINODALES

Dr. ADRIÁN GUADALUPE SOLER MARTÍNEZ
DIRECTOR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ
SINODAL

Dra. MA. ESTELA VÁZQUEZ BARRIOS
SINODAL

Dra. LUCÍA GUADALUPE ABADÍA GARCÍA
SINODAL

ÍNDICE GENERAL

Página

ÍNDICE GENERAL i
ÍNDICE DE FIGURAS iii
ÍNDICE DE CUADROS iv
RESUMEN .....
I. INTRODUCCIÓN 1
II. ANTECEDENTES 3
II.1 Almidón 3
II.1.1 Composición y organización granular del almidón 4
II.2 Funcionalidad del almidón 5
II.3 Almidón de sorgo 8
II.4 Almidones modificados 8
II.4.1 Tratamiento de calor seco 9
III. OBJETIVOS 12
III.1 Objetivo general 12
III.2 Objetivos específicos 12
IV. METODOLOGÍA 13
IV.1 Materiales 13
IV.2 Modificación del almidón de sorgo mediante calor seco 13
IV.3 Análisis estructural 14
IV.3.1 Microscopía electrónica de barrido 14
IV.3.2 Difracción de rayos X 14
IV.3.3 Espectroscopía de infrarrojo 14
IV.4 Análisis funcional 14
IV.4.1 Propiedades de gelatinización y retrogradación 14
IV.4.2 Índice de solubilidad y poder de hinchamiento 15
IV.4.3 Capacidad de absorción de agua y de aceite 15
IV.5 Análisis estadístico 16

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 17
V.1 Morfología granular del almidón de sorgo 17
V.2 Patrón de difracción y cristalinidad relativa del almidón de sorgo 18
V.3 Estructura de dobles hélices del almidón de sorgo..... 20
V.4 Propiedades de gelatinización y retrogradación del almidón de sorgo 23
V.5 Índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento del almidón de sorgo 26
V.6 Capacidad de absorción de agua y de aceite del almidón de sorgo 29
V. CONCLUSIONES..... 37
VI. BIBLIOGRAFÍA..... 38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Página

1 Estructura de la amilosa (Extraída de Tester y col., 2004). 3
2 Estructura de la amilopectina (Extraída de Tester y col., 2004)..... 3
3 Ruta bioquímica (A), estructura molecular (B) y orden supramolecular del almidón (C), adaptada de Pfister y Zeeman, 2016. 5
4 Tipos de estructura cristalina del almidón (Extraída de Tester y col., 2004). .. 6
5 Eventos ocurridos en los gránulos de almidón durante el calentamiento, enfriamiento y almacenamiento en presencia de agua, adaptada de Joye (2019). 7
6 Representación esquemática de las condiciones de calor seco utilizadas para la modificación del almidón de sorgo. 13
7 Micrografías de microscopía electrónica de barrido de los gránulos de almidón de sorgo nativo (A) y modificados por calor seco a 120 (B), 140 (C), 160 (D), 180 (E) y 200 °C (F). 17
8 Patrones de difracción de rayos X y cristalinidad relativa del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. S: sorgo; CR: cristalinidad relativa. 19
9 Espectros de infrarrojo del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 21
10 Deconvolución de picos de infrarrojo a 1047, 1022 y 995 cm^{-1} del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 22
11 Índice de solubilidad de agua del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 27
12 Poder de hinchamiento del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 28
13 Capacidad de absorción de agua del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 30
14 Capacidad de absorción de aceite del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro Página

1 Estudios recientes del efecto del calor seco en distintas fuentes de almidón..... 10
2 Parámetros DD y DO del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. 23
3 Propiedades de gelatinización y retrogradación del almidón de sorgo nativo y modificado por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C..... 24
4 Análisis de correlaciones de los parámetros estructurales y funcionales del almidón de sorgo modificado por calor seco. 33

RESUMEN

Actualmente, diversas fuentes botánicas tradicionales con alto contenido de almidón se utilizan principalmente como fuente de alimento para el ser humano, por lo que la búsqueda de fuentes no convencionales de almidón es requerida para fines tecnológicos para la industria alimentaria. Por esta razón, en la presente investigación, se usó almidón de sorgo para provocar una modificación estructural y funcional mediante el tratamiento con calor seco, un proceso físico simple que no requiere agua. El tratamiento se aplicó de manera continua a temperaturas de 120, 140, 160, 180 y 200 °C por 2 horas en un horno con circulación de aire. Las micrografías de MEB mostraron la aparición de poros y grietas, así como la formación de conglomerados granulares después de la aplicación del calor seco, que se hizo más evidente con el incremento en la temperatura. Asimismo, la difracción de rayos X indicó disminución en la cristalinidad sin cambio en el patrón de difracción, mientras que la espectroscopia de infrarrojo mostró la disrupción de la estructura de dobles hélices, en función del incremento en la temperatura. Con respecto a la funcionalidad, el proceso de calor seco disminuyó el poder de hinchamiento y las propiedades de gelatinización, afectando la retrogradación del almidón de sorgo, mientras que la solubilidad aumentó. Además, se evidenció que las propiedades de capacidad de absorción de agua y de aceite mejoraron con el tratamiento. Los resultados demostraron que el proceso de calor seco es un método efectivo para modificar el almidón de sorgo, lo que permite modular sus propiedades. Los hallazgos de esta investigación indican que el almidón de sorgo modificado por calor seco presenta potencial para ser aplicado como un ingrediente alimentario, en aplicaciones como almidón resistente, películas biodegradables, productos a base de pasta y sustitutos de grasa en repostería o cárnicos, dependiendo de la intensidad del tratamiento.

I. INTRODUCCIÓN

El almidón es un polisacárido constituido por moléculas de amilosa y amilopectina organizadas en gránulos semicristalinos. Su función es de reserva energética en plantas y además es la fuente primaria de energía para el ser humano. La proporción de amilosa/amilopectina presente en el gránulo, así como el origen botánico, definen tanto el orden estructural del almidón como su funcionalidad.

El almidón es un polisacárido muy abundante en la naturaleza y por su proceso de extracción relativamente sencillo es de bajo costo, además de que no genera residuos que puedan representar algún riesgo o toxicidad para el ser humano. El almidón es también un material totalmente biodegradable y presenta propiedades fisicoquímicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones industriales. Puntualmente, dichas características le permiten aplicarse en la industria alimentaria como agente emulsificante, espesante, texturizante, mejorador de la calidad, encapsulante, nutracéutico y material formador de recubrimientos.

Los gránulos de almidón nativo, tal como se encuentran en la naturaleza, presentan propiedades funcionales que no siempre se adaptan a los requerimientos industriales. Por esta razón, en la mayoría de las ocasiones el almidón debe ser modificado para mejorar su estabilidad térmica, solubilidad, resistencia mecánica o para conferirle nuevas propiedades. Los métodos utilizados para la modificación del almidón son físicos, químicos, enzimáticos y biotecnológicos e incluso las combinaciones entre ellos.

Entre los métodos de modificación del almidón recomendados para aplicaciones alimentarias se encuentran las altas presiones, la retrogradación, el microondas, el ultrasonido y el calor seco, ya que al ser métodos físicos no utilizan agentes químicos durante su aplicación. Entre ellos, el calor seco es un proceso de operación simple, ecológico, económico, seguro y sin uso de agua, que modifica de manera efectiva la estructura y la funcionalidad del almidón.

A nivel global, el maíz, el trigo y el arroz son las fuentes botánicas más utilizadas para la extracción, comercialización y aplicación de almidón con mayor importancia. Sin embargo, dichos granos y cereales representan también la fuente más accesible de alimento para el ser humano, lo que requiere la búsqueda de fuentes alternativas de almidón para no comprometer la seguridad alimentaria. El sorgo es una gramínea con tolerancia a altas temperaturas, resistencia al frío y capaz de desarrollarse en suelos con elevado contenido de sales y poco fertilizados. Además, el sorgo posee un alto contenido de almidón y similitudes en funcionalidad con el almidón de maíz, que lo convierten en una fuente no convencional atractiva para potenciales aplicaciones comerciales en alimentos.

A pesar de la creciente importancia del almidón de sorgo, su modificación utilizando métodos físicos y ecológicos que permitan mejorar sus propiedades y extender sus posibles aplicaciones no se ha estudiado ampliamente en comparación con los almidones comerciales tradicionales. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se exploró la estructura y funcionalidad del almidón de sorgo modificado por calor seco a diferentes temperaturas (120, 140, 160, 180 y 200 °C). El impacto del método de modificación en la funcionalidad se enfocó particularmente en aquellas propiedades que permitirían la potencial aplicación del almidón de sorgo como ingrediente alimentario, incluyendo el poder de hinchamiento, la solubilidad en agua y la capacidad de absorción de agua y de aceite. Asimismo, también se discutió la relación entre estructura y funcionalidad que permitió proponer los principales mecanismos ocurridos durante la modificación. La información derivada de este trabajo permitirá incrementar el conocimiento sobre la modificación por calor seco y potenciales aplicaciones del almidón de sorgo como ingrediente en la industria alimentaria.

II. ANTECEDENTES

II.1 Almidón

El almidón es un polisacárido conformado por 2 polímeros de glucosa, el primero unido por enlaces glucosídicos α-1,4 para dar origen a la amilosa (Figura 1), la cual presenta una estructura esencialmente lineal; y el segundo, la amilopectina (Figura 2), que presenta una estructura ramificada debido a la presencia de enlaces glucosídicos α-1,4 y α-1,6.

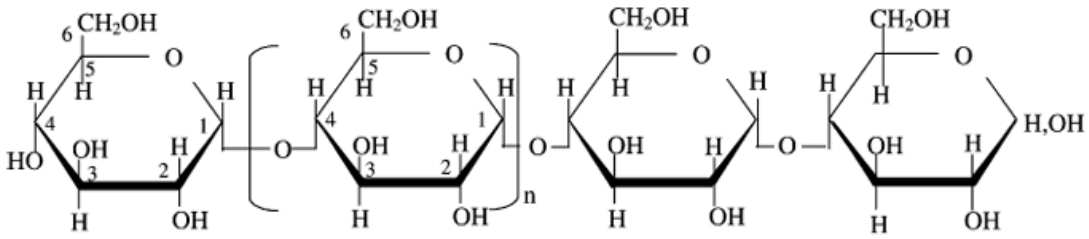


Figura 1. Estructura de la amilosa (Extraída de Tester y col., 2004).

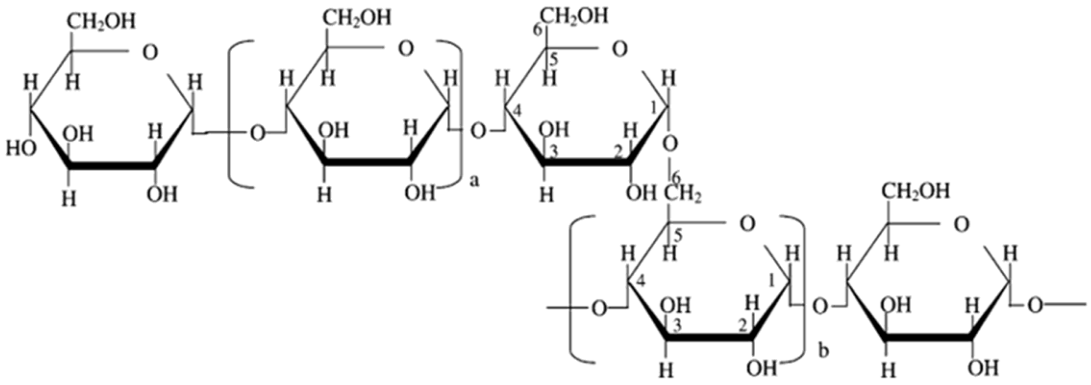


Figura 2. Estructura de la amilopectina (Extraída de Tester y col., 2004).

Ambas moléculas se organizan en gránulos semicristalinos. Estos gránulos de almidón se encuentran en diversas fuentes botánicas como el maíz, el arroz, el trigo, el sorgo, entre otras. El almidón contribuye con un 50-70 % de la energía requerida en la dieta humana ya que es una fuente directa de glucosa (Copeland y col., 2009), además de que es un biomaterial de bajo costo y biodegradable, por lo que es de

gran interés para la industria alimentaria (Chen y col., 2017; Lei y col., 2020). El almidón tiene aplicaciones como agente espesante, emulsificante y texturizante en productos como salsas, bebidas y alimentos nutracéuticos.

II.1.1 Composición y organización granular del almidón

El almidón se compone principalmente de amilosa y amilopectina, que representan aproximadamente el 98-99 % del peso seco. Dependiendo de la proporción de ambos componentes, los almidones son clasificados como normales (~ 30 % de amilosa), cerosos (prácticamente sin amilosa) y altos en amilosa (>50 % de amilosa) (Copeland y col., 2009). En menor proporción, el almidón posee componentes como lípidos en forma de lisofosfolípidos y ácidos grasos libres, además de proteínas y minerales. Los gránulos de almidón contienen alrededor de 0.1-0.7 % de proteína que en su mayoría incluye residuos de enzimas (principalmente almidón sintasas) y en cuanto a los minerales; calcio, magnesio, fósforo, potasio y sodio, se encuentran en cantidades mínimas (<0.4 %) (Tester y col., 2004).

Además de la composición, la organización granular del almidón contribuye a la funcionalidad del mismo. Los polímeros de glucosa se ensamblan en gránulos semicristalinos e insolubles en agua a temperatura ambiente que presentan una organización jerárquica (Figura 3) (Pfister y Zeeman, 2016). A nivel molecular, la amilopectina posee un nivel de ramificación mayor al de la amilosa (la cual se considera esencialmente lineal), con un 5 % más en la proporción de enlaces glucosídicos α-1,6 y constituye el marco estructural del gránulo. En el siguiente nivel de organización, los segmentos lineales adyacentes de amilopectina forman dobles hélices que a su vez pueden asociarse en arreglos cristalinos del tipo A, B o C (Tester y col., 2004).

Los arreglos cristalinos tipo A y B presentan esencialmente la misma estructura de dobles hélices, excepto por un par de dobles hélices adicional en la estructura tipo A (Figura 4). El patrón cristalino tipo C es una combinación de la presencia de los tipos A y B. Entre mayor sea la escala estructural, se encontrarán las laminillas cristalinas y amorfas alternadas (conformadas por dobles hélices y puntos de

ramificación de la amilopectina, respectivamente), los anillos de crecimiento y el gránulo (Qiao y col., 2020). Mientras que en general la estructura supramolecular del almidón es atribuida a la amilopectina, existe evidencia de que la amilosa contribuye a disminuir el orden estructural de los gránulos al localizarse interdispersa entre las dobles hélices de amilopectina y en los puntos de ramificación (Yang y col., 2016).

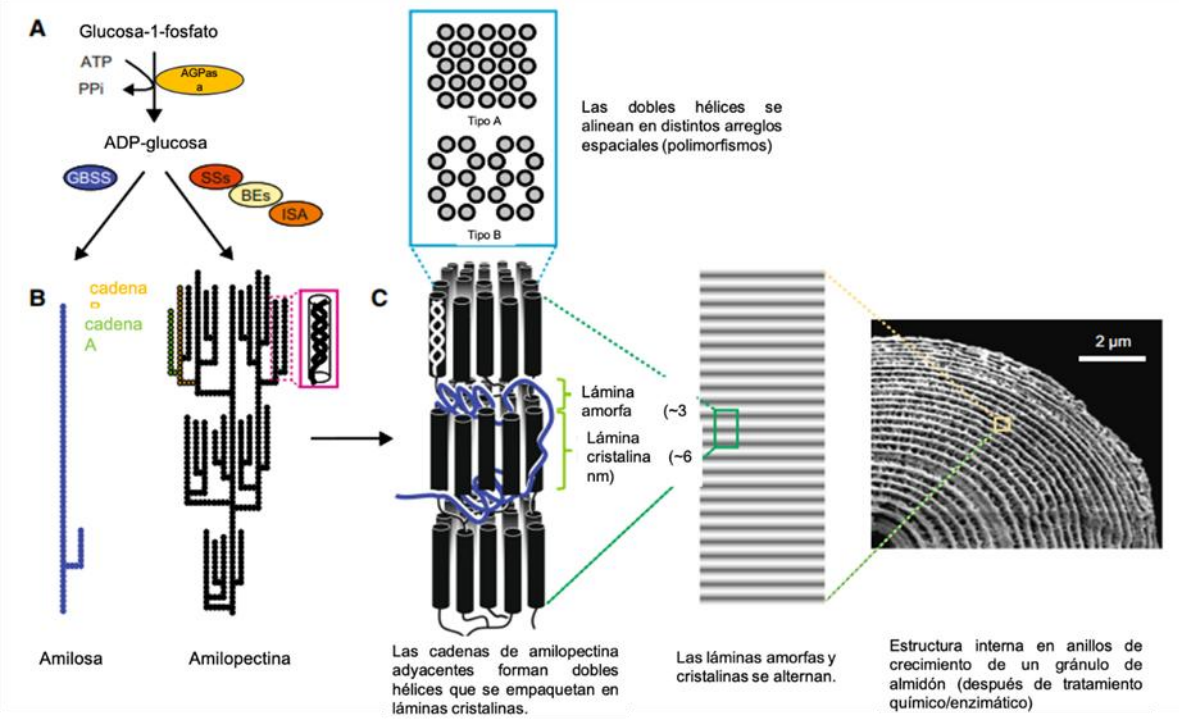


Figura 3. Ruta bioquímica (A), estructura molecular (B) y orden supramolecular del almidón (C), adaptada de Pfister y Zeeman, 2016.

II.2 Funcionalidad del almidón

El almidón es un polisacárido con diversas propiedades funcionales relevantes para la industria. Algunas de estas propiedades se presentan cuando los gránulos son calentados en exceso de agua y pierden su orden estructural, en un proceso que se conoce como gelatinización.

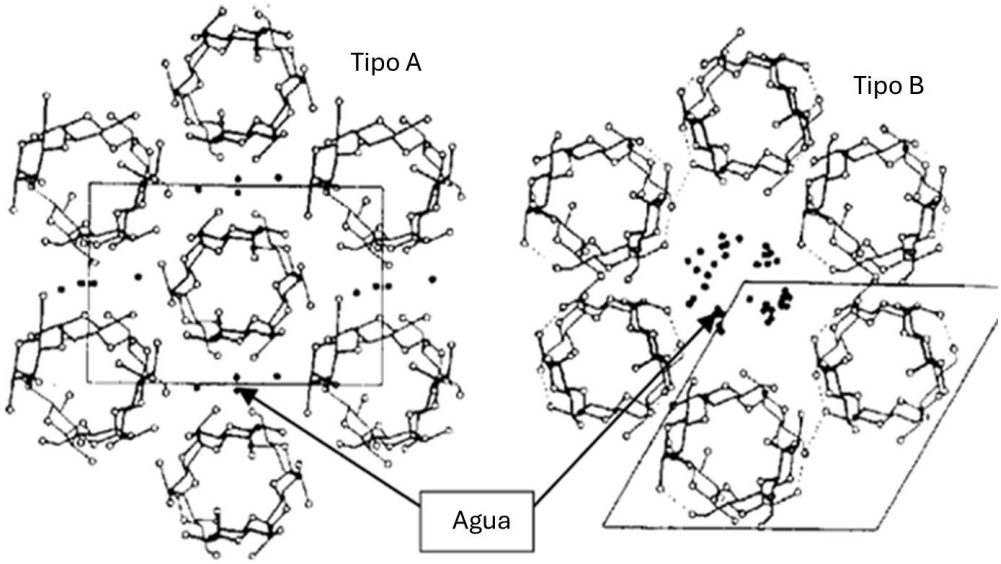


Figura 4. Tipos de estructura cristalina del almidón (Extraída de Tester y col., 2004).

Previo a la gelatinización, los gránulos comienzan a captar agua y a incrementar varias veces su volumen, dando lugar a la propiedad de hinchamiento, que influye en las propiedades de textura, sabor y características nutricionales de los alimentos (Jia y col., 2023). Simultáneamente, moléculas de amilosa se lixivian del gránulo hacia el medio acuoso, ya que son solubles, lo que influye en la consistencia, formación de pastas y facilidad para formar películas de las suspensiones (Zhang y col., 2019). Al alcanzar la temperatura de gelatinización, los gránulos pierden su orden estructural y como resultado, las moléculas de amilosa y amilopectina se desorganizan. La propiedad de gelatinización del almidón es relevante para determinar la digestibilidad de productos terminados (Wang y Copeland, 2013).

Posteriormente, durante el enfriamiento y almacenamiento de las moléculas de almidón gelatinizadas, estas se reorganizan hacia un estado ordenado de dobles hélices y cristales, en un proceso que se conoce como retrogradación. Este proceso, al igual que la gelatinización, influye en la digestibilidad de los alimentos (Liu y col., 2019). En la Figura 5 se muestra una representación de los eventos ocurridos

durante el calentamiento del almidón en exceso de agua. Estas propiedades dependen de la fuente botánica y de factores de proceso como la temperatura de calentamiento, cantidad de agua, tiempo de almacenamiento y presencia de aditivos (Wang y col., 2015).

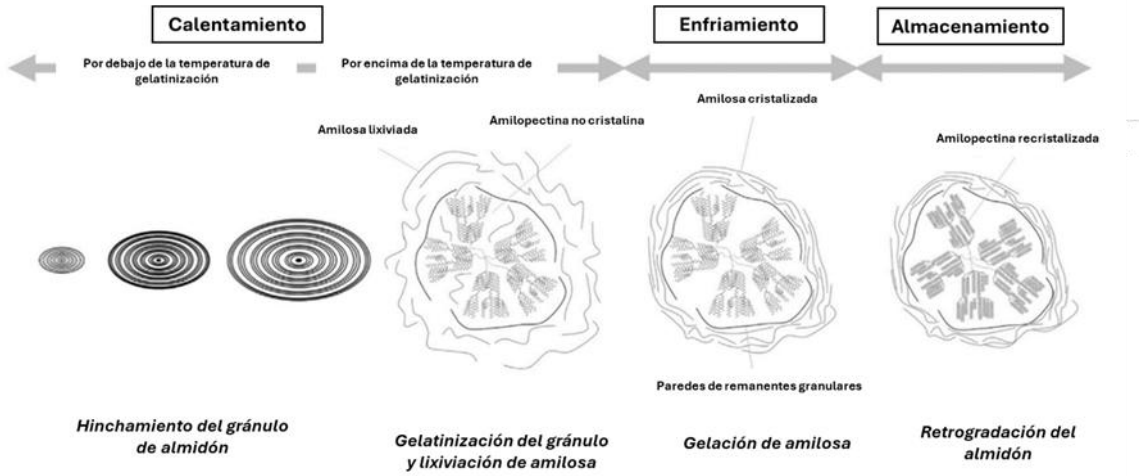


Figura 5. Eventos ocurridos en los gránulos de almidón durante el calentamiento, enfriamiento y almacenamiento en presencia de agua, adaptada de Joye (2019).

Asimismo, existen otras propiedades relevantes del almidón que están relacionadas con su capacidad para captar y retener compuestos, como la absorción de agua y de aceite. La capacidad de absorción de agua es una relevante propiedad funcional que es resultado de las interacciones entre el almidón y el agua, la cual influye en la funcionalidad de productos a base de almidón en la industria alimentaria. La absorción de agua del almidón se ve afectada por diversos factores, como la composición, la estructura granular superficial y estructuras cristalinas y de dobles hélices, así como la presencia de grupos hidrofílicos (Zhang y col., 2024).

Por otra parte, la absorción de aceite del almidón puede deberse al atrapamiento de moléculas de lípidos en los poros de los gránulos por capilaridad o dentro de estructuras helicoidales de amilosa o amilopectina (Ashwar y col., 2016), siendo una

propiedad relevante cuando el almidón se incorpora en formulaciones de alimentos que involucran lípidos como ingredientes (Astuti y col., 2018).

II.3 Almidón de sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor*) es una graminea que presenta gran tolerancia a condiciones climáticas adversas como calor extremo, frío y sequía. Además, el sorgo puede desarrollarse en suelos con elevada proporción de sales y con poca presencia de fertilizante (Jafari y Koocheki, 2024; Shaikh y col., 2024). El ciclo de vida de la planta de sorgo es de ~90-150 días y su crecimiento incluye la germinación, formación de panicula y madurez (Roozeboom y Prasad, 2019). Aunque el sorgo se ha destinado principalmente a la alimentación de ganado y representa una fuente sustentable y renovable para la obtención de biocombustible (Ameen y col., 2024), este posee un alto contenido de almidón (~70 %), lo cual lo convierte en una fuente no convencional para su extracción con potenciales aplicaciones en alimentos. Adicionalmente, posee 11.0 % de proteína, 3.2 % de lípidos, 2.7 % de fibra cruda y 1.8 % de minerales (Xiong y col., 2019; Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). Su explotación para la obtención de almidón lo convierte en una alternativa al maíz, el trigo y la papa, los cuales presentan mayor valor alimentario (Shaikh y col., 2024). El almidón de sorgo presenta una estructura cristalina tipo A, un contenido de amilosa de ~25.5 % y una cristalinidad relativa de ~26 %, aunque algunas diferencias pueden presentarse de acuerdo a la variedad (Haziman y col., 2025). Además, el almidón de sorgo posee una morfología granular principalmente poliédrica/poligonal con poros superficiales, una moderada a elevada propiedad de hinchamiento y baja digestibilidad (Shaikh y col., 2024).

II.4 Almidones modificados

La modificación del almidón nativo es necesaria para cumplir los requerimientos industriales del mismo, ya que en muchos casos, los gránulos son insolubles en agua y sus propiedades fisicoquímicas, como la estabilidad térmica y mecánica, no son óptimas para su procesamiento. Adicionalmente, el almidón nativo presenta rápida digestibilidad en el cuerpo, conduciendo a un índice glicémico mayor (Apriyanto y col., 2022; Kumari y Sit, 2023). El uso de ciertos métodos trae

numerosos beneficios para las aplicaciones del almidón tales como mejoras en la funcionalidad, estabilidad, textura, versatilidad del producto, sustentabilidad y reducción de costos (Kumari y Sit, 2023).

Existen distintos tipos de modificaciones que pueden realizarse sobre el almidón, las cuales se pueden clasificar como procesos físicos, químicos, enzimáticos y biotecnológicos (Ogunsona y col., 2018). Adicionalmente, estos se pueden combinar, dando lugar a una modificación dual (Kumari y Sit, 2023). La modificación física mejora las propiedades funcionales, la estructura granular, la viscosidad y otras propiedades sin el uso de reacciones químicas o enzimáticas que implicarían el uso de químicos o procesos muy costosos, respectivamente. Algunos de estos procesos son el uso de calor seco, microondas, plasma frío o extrusión, entre otros (Punia, 2020).

II.4.1 Tratamiento de calor seco

El tratamiento de calor seco consiste en calentar los gránulos de almidón con un contenido de humedad menor al 10 % a temperaturas entre 120 y 200 ºC por un periodo de tiempo específico, lo que resulta en la modificación de las propiedades fisicoquímicas de los gránulos (Lei y col., 2020; Oh y col., 2018; Zhang y col., 2021b). Este proceso es simple, seguro y efectivo para modificar la estructura y las propiedades funcionales del almidón, además de que no genera residuos y no requiere de agentes químicos que puedan causar algún daño al ser humano (La Fuente y col., 2022; Maniglia y col., 2020).

Aunque el método de calor seco ha sido utilizado para modificar la estructura y propiedades de almidones de diversas fuentes botánicas (Cuadro 1), su mecanismo de acción sobre los gránulos se ha comenzado a describir recientemente. Dicho mecanismo se basa en el movimiento del calor por conducción desde la superficie exterior hacia la superficie de los gránulos, la cual se modifica junto con la estructura interna. Las altas temperaturas aceleran el movimiento de las moléculas dando paso a la ruptura y el colapso de la estructura granular. Además, se promueve la ruptura de enlaces de hidrógeno entre las cadenas de almidón (Pandey y col., 2023).

Recientemente, Velazquez y col. (2025) mencionaron que la energía aplicada durante el proceso acelera el movimiento de moléculas de agua (presentes en los gránulos) y de moléculas de almidón, además de la ruptura de los puentes de hidrógeno. Adicionalmente, la evaporación de moléculas de agua desde la estructura granular y una gelatinización o pérdida del orden estructural parcial son responsables de afectaciones morfológicas, cambios en la cristalinidad, desdoblamiento de dobles hélices y degradación del orden molecular.

Cuadro 1. Estudios recientes del efecto del calor seco en distintas fuentes de almidón.

Fuente botánica	Condiciones de proceso	Hallazgo principal	Referencia
Suran	120 °C por 2, 4 y 6 h; continuo	Incremento en las propiedades de hinchamiento y solubilidad	Banerjee y Kumar (2024)
Mijo	120 °C por 4 h; continuo	Incremento en la propiedad de solubilidad	Gautam y col. (2024)
Taro	90, 110, 130 y 150 °C por 1, 3, 5 y 7 h; continuo	Incremento en las propiedades de solubilidad y disminución de las temperaturas de gelatinización	Hui y col. (2024)
Papa	120 °C por 3, 6, 9, 12 y 15 h; continuo y repetido	Reducción de la cristalinidad	de Oliveira Maior y col. (2024)
Garbanzo	180 °C por 3, 6, 9, 12 y 15 h	Disminución de la cristalinidad y del orden de dobles hélices	Zhang y col. (2024)

El tratamiento de calor de seco ha sido utilizado para modificar la estructura y la funcionalidad de almidones de diversas fuentes botánicas como maíz (Lei y col., 2020; Zou y col., 2020), papa (de Oliveira Maior y col., 2024), arroz (Qiu y col., 2015),

entre otras. El calor seco aplicado en almidón de maíz desde 140 a 200 °C reduce el tamaño molecular y la cristalinidad (Lei y col., 2020), mientras que a 140 °C mejora las fracciones de almidón resistente y de lenta digestibilidad (Zou y col., 2020). La aplicación de calor seco en otros almidones comerciales tradicionales, como el de papa, también disminuyó su cristalinidad a 120 °C (de Oliveira Maior y col., 2024); sin embargo, su aplicación a 130 °C aumentó la cristalinidad de almidón de arroz (Qiu y col., 2015). Almidones de otras fuentes botánicas mostraron cambios en sus propiedades derivados de la aplicación de calor seco. Por ejemplo, la solubilidad de almidón de taro y trigo se mejoró después del tratamiento a 90, 110, 130 y 150 °C (Hui y col., 2024) o 130 °C (Zhang y col., 2021b), respectivamente, mientras que el almidón de garbanzo modificado a 180 °C mostró una degradación estructural (Zhang y col., 2024) y el almidón de quinoa tratado a 140 °C incrementó su absorción de agua (Zhou y col., 2021) . Las condiciones del tratamiento, tales como temperatura, tiempo y régimen de calentamiento, determinan la intensidad de los cambios en el almidón (Pandey y col., 2023). Los almidones modificados por calor seco son utilizados como agentes espesantes en alimentos como salsas y sopas, así como también para la formación de geles en productos como jaleas (Kumari y Sit, 2023).

En la presente investigación, se modificó almidón de sorgo mediante calor seco a temperaturas de 120, 140, 160, 180 y 200 °C durante 2 horas para estudiar los cambios estructurales y funcionales con el propósito de explorar su potencial como ingrediente alimentario.

III. OBJETIVOS

III.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del tratamiento continuo de calor seco a diferentes temperaturas en la organización estructural y propiedades funcionales del almidón de sorgo.

III.2 Objetivos específicos

- Modificar almidón de sorgo aplicando el tratamiento de calor seco de forma continua a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.
- Caracterizar la organización estructural a nivel de morfología granular, cristalinidad y dobles hélices en el almidón de sorgo nativo y modificado por calor seco.
- Determinar las propiedades térmicas, de hidratación y de absorción de agua o aceite del almidón de sorgo nativo y modificado por calor seco.

IV. METODOLOGÍA

IV.1 Materiales

Se utilizó almidón de sorgo (*Sorghum bicolor*) donado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

IV.2 Modificación del almidón de sorgo mediante calor seco

El almidón de sorgo con un contenido de humedad < 10 % se modificó mediante el tratamiento con calor seco de acuerdo con el método reportado por Lei y col. (2020). Se colocaron 5 g de muestra en charolas de aluminio y se calentaron en un horno con circulación de aire (FD, BINDER, Alemania) a 120, 140, 160, 180 y 200 °C durante 2 horas. Posteriormente, los almidones de sorgo modificados por calor seco se enfriaron dejándolos reposar a temperatura ambiente y se almacenaron en recipientes de vidrio cerrados a 25 °C para analizarse estructural y funcionalmente (Figura 6). Las muestras se rotularon de acuerdo con la temperatura de modificación como S-120, S-140, S-160, S-180 y S-200.

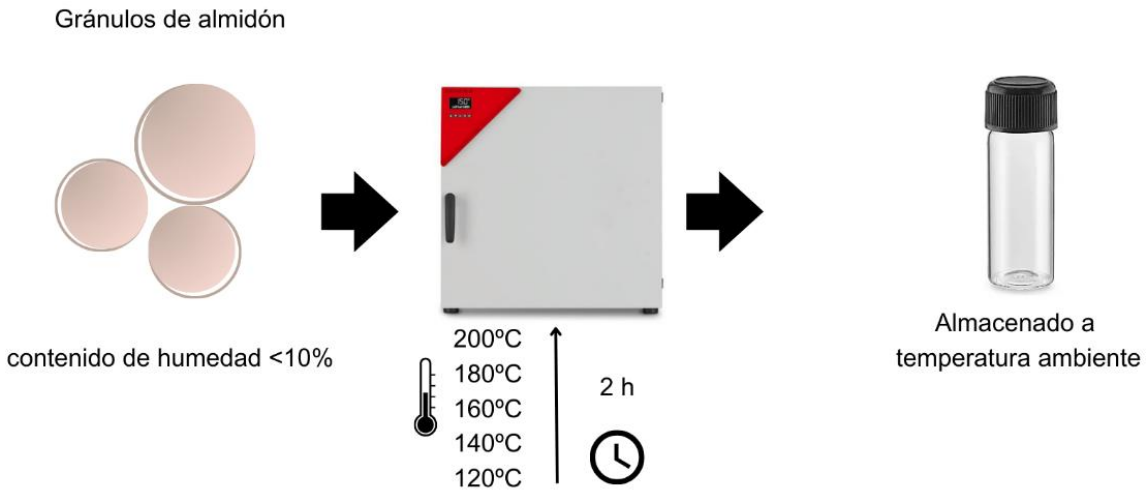


Figura 6. Representación esquemática de las condiciones de calor seco utilizadas para la modificación del almidón de sorgo.

IV.3 Análisis estructural

IV.3.1 Microscopía electrónica de barrido

Los cambios en la morfología granular del almidón de sorgo ocasionados por el tratamiento de calor seco se examinaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Las muestras se colocaron en soportes de aluminio utilizando cinta conductiva de carbono y se observaron las características morfológicas en un microscopio electrónico de barrido (Phenom Pro, Phenom-World., Países Bajos) a un voltaje de 5 kV y a una magnificación de 3,500x.

IV.3.2 Difracción de rayos X

La estructura cristalina de los almidones de sorgo nativo y modificados se determinó mediante difracción de rayos X (DRX). Las muestras se analizaron en un difractómetro de rayos X (D8 ADVANCE, Bruker, Estados Unidos) en un rango de 10° a 35° (2θ) a temperatura ambiente (~25 °C). Se determinó la cristalinidad relativa (CR) de las muestras utilizando la Ecuación 1, en donde A_c representa el área cristalina y A_a el área amorfa en los difractogramas de rayos X (Shah y col., 2016).

Ecuación 1:

$$CR\ (\%) = \frac{Ac}{(Ac + Aa)} 100$$

IV.3.3 Espectroscopía de infrarrojo

La organización estructural a nivel de dobles hélices se caracterizó mediante espectroscopía de infrarrojo (IR)(Warren y col., 2016). Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro de infrarrojo (Spectrum GX, Perkin Elmer Inc., Estados Unidos) en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1}. Se calcularon las relaciones de las intensidades a 995/1022 y 1047/1022 cm^{-1}.

IV.4 Análisis funcional

IV.4.1 Propiedades de gelatinización y retrogradación

Las propiedades de gelatinización y retrogradación de las muestras se determinaron utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC 1 STARE System, Mettler-

Toledo Inc., Suiza). Para las propiedades de gelatinización, se mezclaron 3 mg de almidón con 12 µL de agua destilada en una charola de aluminio que se cerró herméticamente y se calentó de 30 a 110 °C a 10 °C por min. Las muestras gelatinizadas se almacenaron a 4 °C durante 7 días para determinar las propiedades de retrogradación en un rango de 30 a 110 °C a 10 °C por min. Se registraron las temperaturas de inicio (T_i), pico (T_p) y final (T_f), además de los cambios de entalpía (ΔH) utilizando el software STARe versión 9.30.

IV.4.2 Índice de solubilidad y poder de hinchamiento

El índice de solubilidad en agua y el poder de hinchamiento de las muestras se midieron utilizando el método descrito por Fonseca-Florido y col. (2016) con algunas modificaciones. Se prepararon suspensiones con 40 mg de almidón y 1 mL de agua destilada, las cuales se calentaron a 90 °C por 30 min y se dejaron enfriar en un baño de hielo (~4 °C) por 5 min. Posteriormente, el gel resultante se centrifugó (Centrificient III, CRM Globe, Estados Unidos) a 13 000 rcf por 30 min a temperatura ambiente (25 °C) y el sobrenadante se secó en un horno de aire a 60 °C durante 12 h. El índice de solubilidad en agua se calculó con el peso del sobrenadante seco utilizando la Ecuación 2 y el poder de hinchamiento con el peso del sedimento utilizando la Ecuación 3.

Ecuación 2:

$$Índice\ de\ solubilidad\ (\%) = \frac{Peso\ del\ sobrenadante\ seco}{Peso\ de\ la\ muestra} 100$$

Ecuación 3:

$$Poder\ de\ hinchamiento\ (g/g) = \frac{Peso\ del\ sedimento}{Peso\ de\ la\ muestra - Peso\ del\ sobrenadante\ seco}$$

IV.4.3 Capacidad de absorción de agua y de aceite

La capacidad de absorción de agua y de aceite de las muestras se midió utilizando el método descrito por Ashwar y col. (2016) con algunas modificaciones. Se prepararon suspensiones con 40 mg de almidón y 1 mL de agua destilada o de aceite de soya que se agitaron en un vortex durante 1 min y se centrifugaron

(Centrificient III, CRM Globe, Estados Unidos) a 13 000 rcf durante 10 min a temperatura ambiente (25 °C). La capacidad de absorción de agua y de aceite se calculó con el peso del sedimento utilizando la Ecuación 4.

Ecuación 4:

$$\text{Capacidad de absorción de agua o de aceite } (\%) = \frac{Peso\ del\ sedimento - Peso\ de\ la\ muestra}{Peso\ de\ la\ muestra} 100$$

IV.5 Análisis estadístico

Se calcularon los valores promedio y se determinaron las desviaciones estándar de mediciones experimentales realizadas por duplicado. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para estimar efectos significativos y se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para establecer diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, con el software Statistica versión 12.

V. **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

V.1 Morfología granular del almidón de sorgo

La Figura 7 muestra la morfología granular del almidón de sorgo antes y después del tratamiento de calor seco a diferentes temperaturas; por microscopía electrónica de barrido (MEB).

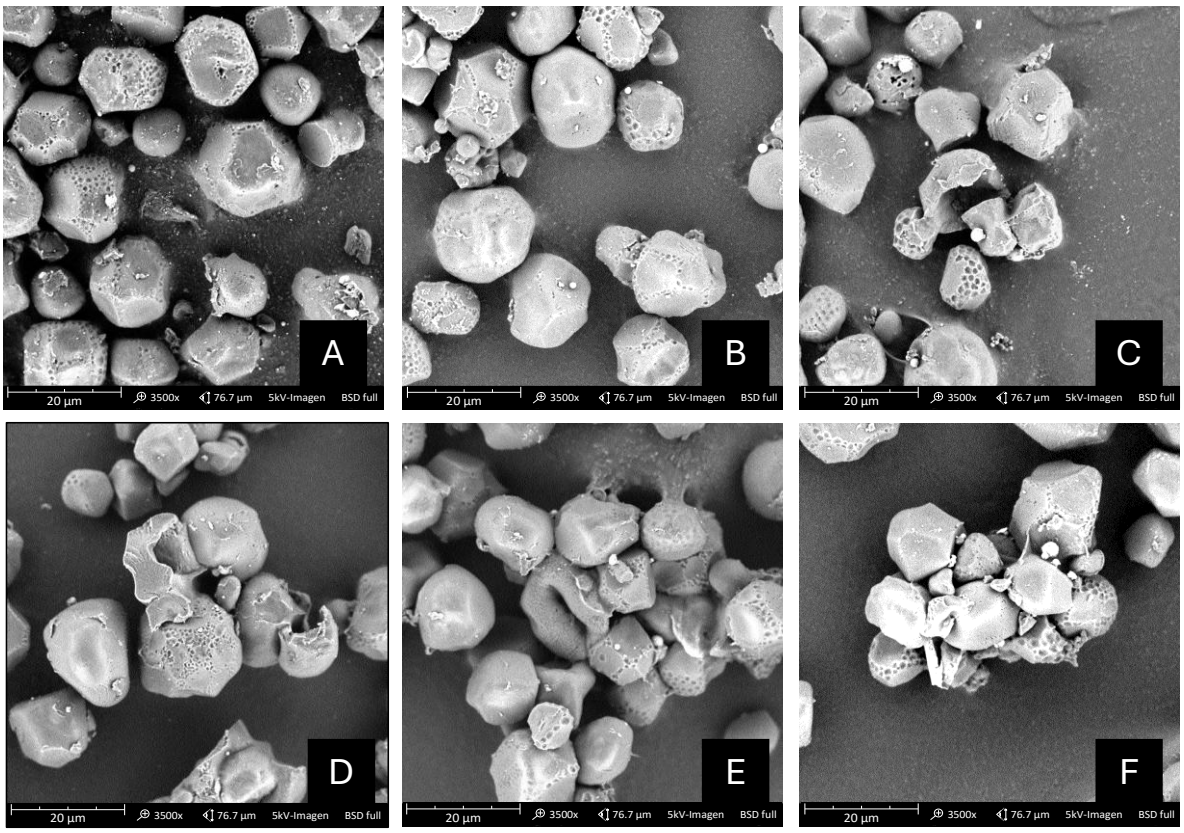


Figura 7. Micrografías de microscopía electrónica de barrido de los gránulos de almidón de sorgo nativo (A) y modificados por calor seco a 120 (B), 140 (C), 160 (D), 180 (E) y 200 °C (F).

La MEB es una técnica utilizada para analizar la microestructura de diversos materiales. Con respecto al almidón, permite examinar su forma granular, que puede ser comúnmente poliédrica, ovalada o esférica, así como sus características superficiales, como la porosidad (Pedrosa Silva Clerici y col., 2019). Los gránulos

de almidón de sorgo en estado nativo mostraron forma de poliedro con bordes irregulares y algunos poros. Estas características morfológicas son consistentes a las reportadas por Zhang y col. (2021a). Al aplicarse el proceso de calor seco a 120 ºC (Figura 7B), en general se observó la retención de la morfología granular; sin embargo, esto no implica que no se modifique la estructura interna de los gránulos, como se observó para almidones de maíz (Lei y col., 2020; Zou y col., 2020) y frijol musgo (Liang y col., 2021) tratados por calor seco. Adicionalmente, algunos gránulos presentaron regiones con apariencia fundida, lo cual puede ser atribuido a la fusión parcial de los mismos.

Al incrementar la temperatura a 140 ºC, los cambios en la morfología se hicieron más evidentes (Figura 7C). Por ejemplo, se observó la aparición de mayor porosidad y también la formación de conglomerados mediante la interconexión de los gránulos. Dichos cambios podrían explicarse por la lixiviación de la amilosa y también por la salida rápida del gránulo de moléculas de agua en fase de vapor (Velazquez y col., 2025). Los cambios descritos a 120 y 140 °C se hicieron más notorios al incrementar la temperatura del tratamiento a 160, 180 y 200 ºC, resaltándose aún más la aparición de gránulos con apariencia fundida y la presencia de gránulos fragmentados o colapsados derivado del incremento de la presión de vapor interna y la posterior salida rápida de moléculas de agua (Zhou y col., 2021b).

Los cambios observados en la morfología descritos previamente en el almidón de sorgo son similares a los observados por Lei y col., (2020) para almidón de maíz, que se trató a 140, 150, 160, 170, 180, 190 y 200 ºC. Sin embargo, fueron más evidentes las similitudes con la formación de conglomerados y ligeras porosidades, y no tanto con la formación de grietas y apariencia fundida.

V.2 Patrón de difracción y cristalinidad relativa del almidón de sorgo

El patrón de difracción de rayos X de los almidones de sorgo nativo y modificados se muestra en los difractogramas de la Figura 8.

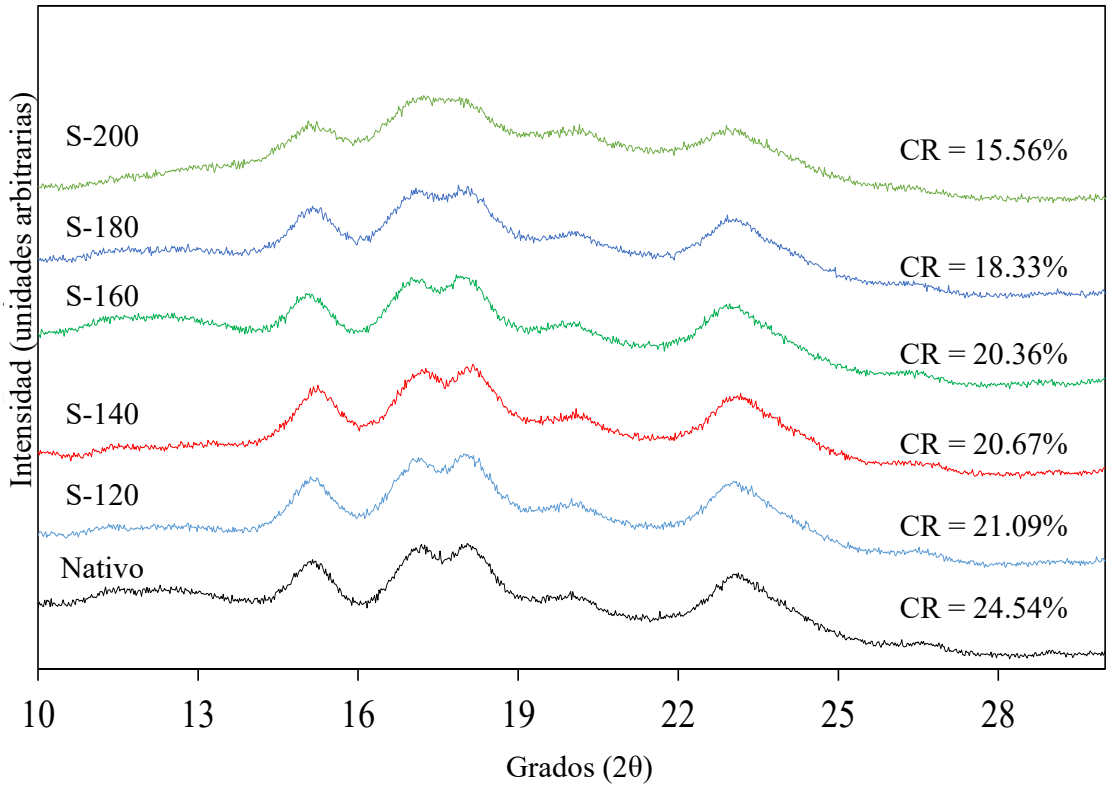


Figura 8. Patrones de difracción de rayos X y cristalinidad relativa del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C. S: sorgo; CR: cristalinidad relativa.

La difracción de rayos X es una técnica que permite detectar arreglos moleculares ordenados y periódicos en los materiales (Epp, 2016). Esta técnica es útil para determinar el patrón de difracción del almidón, que constituye el arreglo repetido y ordenado de dobles hélices de amilopectina y que puede ser del tipo A, B o C(Pedrosa Silva Clerici y col., 2019). El almidón de sorgo nativo mostró picos a ángulos de difracción de 15, 17, 18 y 23°, lo cual indica la presencia de una estructura cristalina tipo A que es consistente con otros estudios de almidón de sorgo (Zhang y col., 2021a).

Los almidones de sorgo modificados mostraron los mismos picos de difracción, reflejando que el proceso de calor seco no afectó el tipo de patrón cristalino, como se observó para almidones de otras fuentes botánicas tratados bajo dicho proceso (Gou y col., 2019; Hui y col., 2024; Lei y col., 2020; Zhou y col., 2021; Zou y col., 2020). Por otra parte, aunque el proceso de calor seco no afectó la estructura cristalina tipo A del almidón de sorgo, sí modificó las intensidades de los picos de difracción, indicando cambios en el nivel de cristalinidad de los gránulos. Los valores de cristalinidad relativa (CR), la cual se define como el porcentaje de regiones cristalinas con respecto al material total (Lopez-Rubio y col., 2008), mostraron una disminución con la aplicación del tratamiento de calor seco, indicando la desorganización de cristales de amilopectina. En los gránulos de almidón nativo, los segmentos adyacentes de amilopectina forman dobles hélices estabilizadas por puentes de hidrógeno, las cuales a su vez se organizan en cristales (Yang y col., 2016). El proceso de calor seco suministró la energía necesaria para interrumpir dichos puentes de hidrógeno, lo cual derivó en la desorganización de los cristales. La disminución de la cristalinidad relativa también se observó en almidones de maíz, taro y garbanzo modificados también por calor seco (Hui y col., 2024; Lei y col., 2020; Zhang y col., 2024b; Zou y col., 2020).

V.3 Estructura de dobles hélices del almidón de sorgo

Los espectros de infrarrojo de los almidones de sorgo nativo y modificados se muestran en la Figura 9. Los picos de absorbancia observados en los espectros son típicos del almidón (Warren y col., 2016) y conforme se aplica el proceso de calor seco a diferentes temperaturas, no se observa la presencia de nuevos picos, indicando que no se presentó una modificación química. Esto implica que el calor seco es un método adecuado para aplicaciones alimentarias, ya que en estas se busca preferentemente evitar el uso de modificaciones químicas. Estos resultados son consistentes con los reportados por Gou y col. (2019) y Liang y col. (2021) para almidones de camote y frijol mungo, respectivamente.

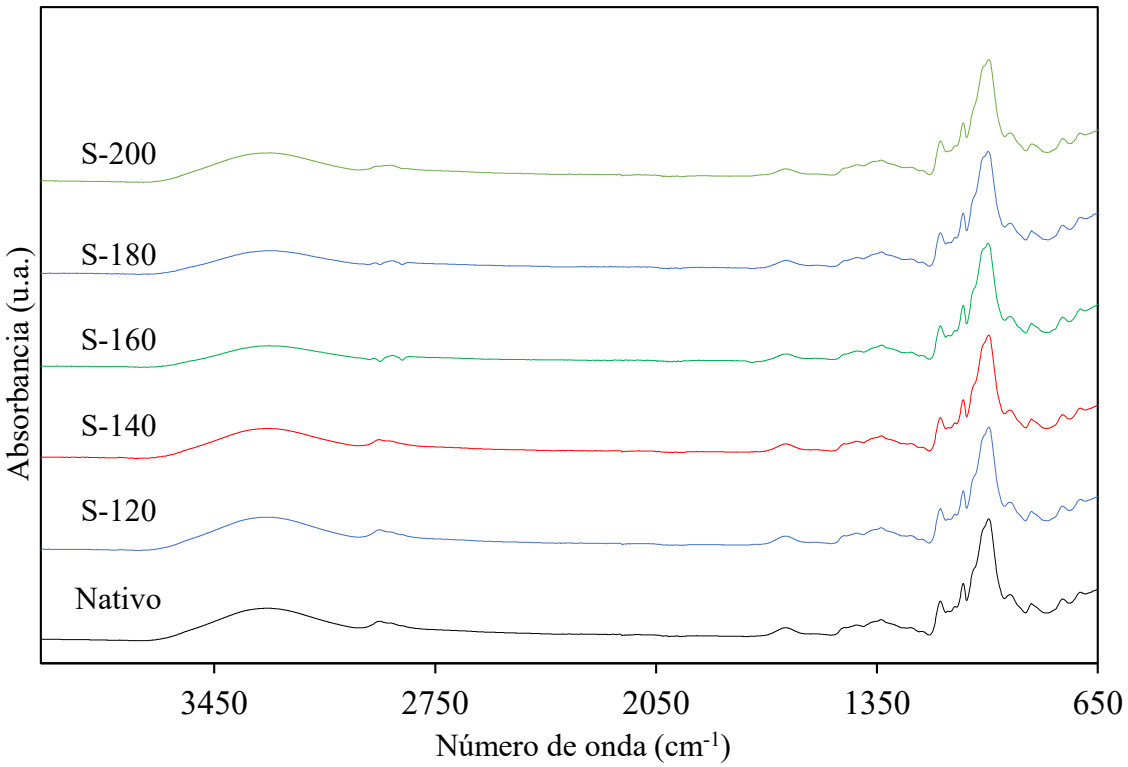


Figura 9. Espectros de infrarrojo del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Por otra parte, la espectroscopía de infrarrojo también es una técnica útil para caracterizar la estructura de dobles hélices del almidón mediante los parámetros DD (995/1022 cm^{-1}, grado de dobles hélices) y DO (1047/1022 cm^{-1}, grado de orden) obtenidos mediante deconvolución (Figura 10), los cuales presentaron cambios después del tratamiento de calor seco (Cuadro 2). Estas relaciones han mostrado ser útiles para indicar, de manera indirecta, el estado de la estructura de dobles hélices del almidón, de manera consistente con técnicas directas y más robustas como la resonancia magnética nuclear (RMN) (Warren y col., 2016).

Ambas relaciones disminuyeron, notándose un cambio más importante después de la aplicación del tratamiento a 140 ºC, indicando una reducción en la proporción de dobles hélices y en el orden de compactación entre ellas.

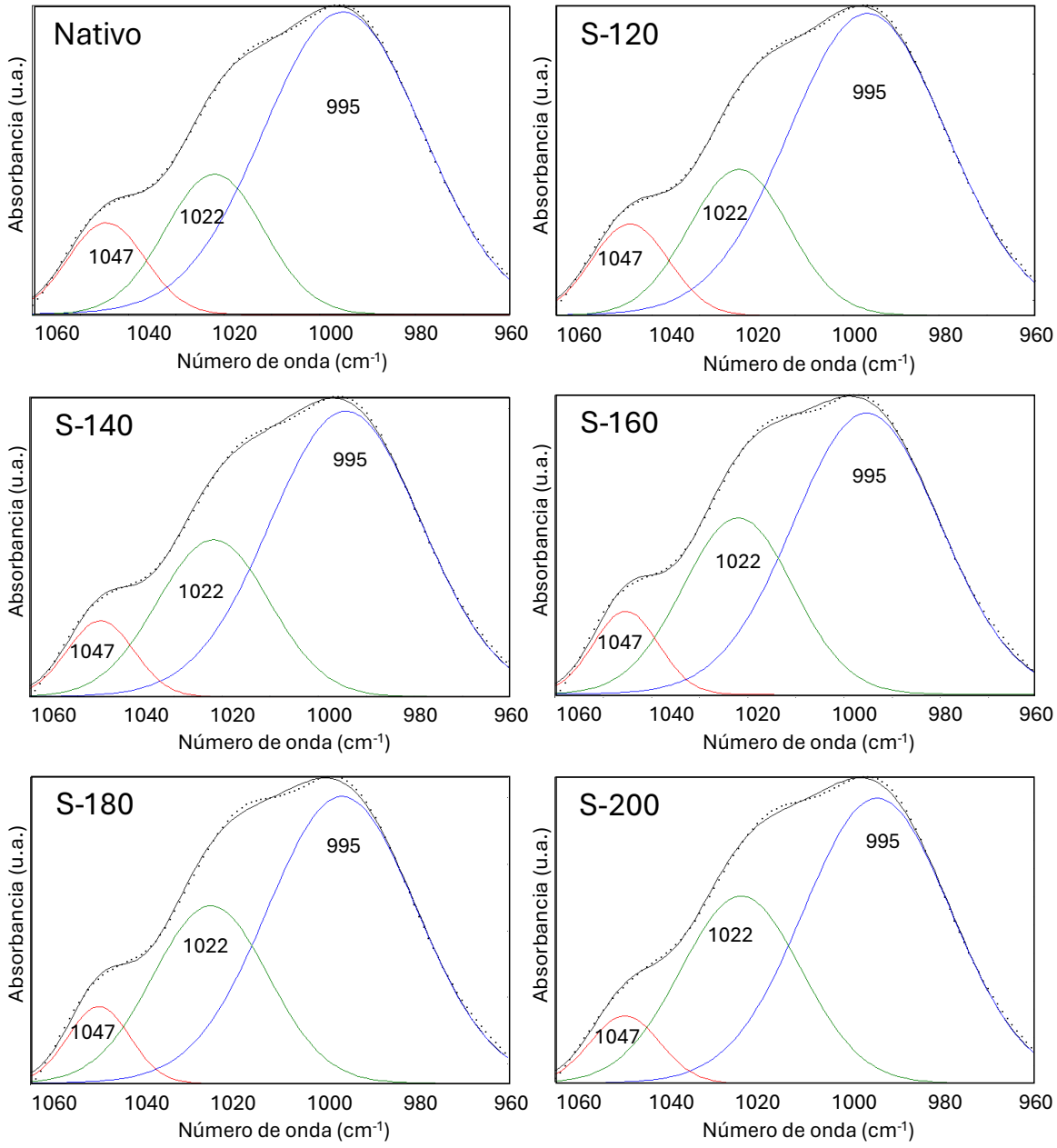


Figura 10. Deconvolución de picos de infrarrojo a 1047, 1022 y 995 cm^{-1} del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Esta tendencia a la disminución puede explicarse en función de la energía aplicada durante el proceso, que fue suficiente para interrumpir los puentes de hidrógeno que estabilizan las dobles hélices del almidón (Gou y col., 2019).

Cuadro 2. Parámetros DD y DO del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Muestra	DD (995/1022 cm^{-1})	DO (1047/1022 cm^{-1})
Nativo	3.47	0.51
S-120	3.23	0.48
S-140	2.45	0.29
S-160	2.10	0.27
S-180	2.08	0.23
S-200	1.84	0.21

Este efecto fue dependiente de la temperatura y resultó en almidones de sorgo modificados con una menor proporción de dobles hélices y un menor orden entre ellas. Estos resultados son similares a los obtenidos por (Zou y col., 2020) para almidón de maíz modificado por calor seco. La disrupción de la estructura de dobles hélices fue consistente con la desorganización de la estructura cristalina observada (Figura 8) ocasionada por el tratamiento de calor seco, indicando que dicho proceso ejerce principalmente un efecto de desorganización en los gránulos de almidón de sorgo.

V.4 Propiedades de gelatinización y retrogradación del almidón de sorgo

Las propiedades de gelatinización y retrogradación de los almidones de sorgo nativo y modificados se presentan en la Cuadro 3.

Las propiedades de gelatinización indican las temperaturas a las cuales ocurre la pérdida del orden granular bajo condiciones de calor y exceso de agua (Liu y col.,

2019). Estas propiedades de gelatinización del almidón se determinan mediante la técnica de calorimetría diferencial de barrido (Wang y col., 2015). En el presente estudio, se observó una transición endotérmica típica de la gelatinización del almidón (Liu y col., 2019) en todas las muestras, excepto en la muestra tratada a 200 °C. En el Cuadro 3 se puede observar una disminución en los valores de T_i, T_p y T_c, parámetros que indican las temperaturas a las cuales se desorganizan los cristales de dobles hélices de amilopectina del almidón durante la gelatinización (Dominguez-Ayala y col., 2023). Esta tendencia muestra una disminución en la estabilidad térmica del almidón de sorgo debida al proceso de calor seco.

Cuadro 3. Propiedades de gelatinización y retrogradación del almidón de sorgo nativo y modificado por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Muestra	T_i (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)
Gelatinización					
Nativo	63.55 ± 0.3^a	70.55 ± 0.0^a	78.47 ± 0.3^a	14.92 ± 0.6^b	9.27 ± 0.4^a
120	62.75 ± 0.3^b	69.32 ± 0.3^b	78.08 ± 1.3^a	15.33 ± 1.6^b	9.73 ± 0.9^a
140	62.52 ± 0.1^b	68.58 ± 0.0^c	77.99 ± 0.3^a	15.46 ± 0.4^b	9.73 ± 0.2^a
160	59.46 ± 0.1^c	66.38 ± 0.2^d	77.41 ± 0.5^a	17.95 ± 0.7^a	7.82 ± 0.7^b
180	52.40 ± 0.0^d	60.01 ± 0.1^e	68.62 ± 0.1^b	16.22 ± 0.1^b	6.67 ± 0.0^c
200	ND	ND	ND	ND	ND
Retrogradación Nativo	43.20 ± 0.1^c	54.17 ± 0.4^a	63.50 ± 0.4^b	20.30 ± 0.3^a	2.08 ± 0.1^b
120	42.53 ± 0.1^d	53.60 ± 0.4^a	63.01 ± 0.1^b	20.47 ± 0.2^a	3.59 ± 0.0^a
140	43.42 ± 0.1^c	53.86 ± 0.2^a	64.01 ± 0.0^a	20.59 ± 0.1^a	3.43 ± 0.4^a
160	44.77 ± 0.5^b	54.00 ± 0.4^a	62.66 ± 0.0^c	17.89 ± 0.4^b	1.45 ± 0.2^c
180	46.26 ± 0.5^a	53.93 ± 0.0^a	62.53 ± 0.1^c	16.26 ± 0.6^c	1.01 ± 0.0^d
200	ND	ND	ND	ND	ND

ND = No detectado. Valores con diferente letra en cada columna son significativamente diferentes, para cada propiedad ($P < 0.05$).

Así mismo, refleja la presencia de cristales con menor estabilidad térmica en los almidones modificados. Estos resultados son consistentes con la disminución de la cristalinidad relativa (Figura 8) y de los parámetros DD y DO (Cuadro 2). La

transición endotérmica de gelatinización no se observó en la muestra tratada a 200 °C. Aunque el orden granular nativo se afectó severamente a 200 °C, las micrografías (Figura 7) muestran todavía la presencia de gránulos de almidón de sorgo con cierta integridad estructural, como se observó en los valores de cristalinidad relativa (Figura 8) y de los parámetros DD y DO (Cuadro 2) pero que no se reflejó en DSC, probablemente debido a que el orden mínimo para ser detectado por esta técnica se perdió. La disminución de las temperaturas de gelatinización también se reportó para almidones de maíz y taro (Hui y col., 2024; Zou y col., 2020).

Por otra parte, el parámetro ΔT (T_c-T_i), el cual refleja la heterogeneidad de los cristales de amilopectina del almidón, mostró en general una tendencia al incremento conforme se aumentó la temperatura del tratamiento. Esto indicaría la presencia de cristales de amilopectina con diferente tamaño como resultado del efecto de desorganización ocasionado por el calor seco (Lei y col., 2020).

La entalpía de gelatinización (ΔH) refleja el orden estructural en los gránulos de almidón, incluyendo la presencia de dobles hélices y de cristales, entre otros parámetros estructurales, al considerarse como la cantidad de energía necesaria para la desorganización de los mismos. Por esta razón, su determinación es un indicador indirecto del orden estructural general del almidón (Warren y col., 2016). En el presente estudio, el valor de ΔH disminuyó en las muestras tratadas a 160 y 180 °C. Esto indicaría matrices estructurales con menor orden después de la modificación, incluyendo menor cristalinidad y proporción de dobles hélices, reflejándose en menor energía requerida para su desorganización. Esta tendencia fue consistente con la reportada para almidones de maíz (Zou y col., 2020) y taro (Hui y col., 2024) tratados por calor seco.

En el caso de las propiedades de retrogradación, también se detectó una transición endotérmica para todas las muestras, excepto para la muestra tratada a 200 °C, al igual que en las propiedades de gelatinización. Las propiedades de retrogradación están relacionadas con las temperaturas a las cuales ocurre la desorganización del

almidón retrogradado posterior al proceso de gelatinización. El proceso de retrogradación consiste en la formación de estructuras ordenadas como cristales y dobles hélices durante el enfriamiento y almacenamiento del almidón gelatinizado (Wang y col., 2015).

En el presente trabajo se observaron cambios notorios en las propiedades de retrogradación del almidón de sorgo modificado por tratamiento de calor seco. La T_i se incrementó después del tratamiento a 160 y 180 ºC, mientras que la T_p no mostró cambios significativos. Por otro lado, la T_c mostró una disminución después del tratamiento a 160 y 180 ºC. Estos resultados podrían atribuirse a que el tratamiento de calor seco modificó la longitud de las cadenas de amilopectina, reflejándose en la formación de cristales de diferente estabilidad térmica (Lei y col., 2020) durante la retrogración del almidón de sorgo gelatinizado.

Lo anterior deja entrever que el tratamiento puede ser selectivo y afectar mayormente a la amilopectina. Además, el parámetro ΔT de retrogradación disminuyó a las temperaturas más elevadas (160 y 180 °C), reflejando una mayor homogeneidad de los cristales retrogradados derivada del proceso de calor seco. Finalmente, los valores de ΔH mostraron una tendencia inconsistente, incrementándose a 120 y 140 ºC, pero disminuyendo a temperaturas más elevadas. Esta tendencia refleja que el tratamiento de calor seco influye en el orden estructural general del almidón de sorgo retrogradado, al definir las propiedades de su contraparte gelatinizada. No se identificaron estudios previos en los que se reportaran las propiedades de retrogradación del almidón después del tratamiento por calor seco, por lo que el estudio de dichas propiedades podría ser una perspectiva interesante para desarrollar el potencial tecnológico del proceso.

V.5 Índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento del almidón de sorgo

El índice de solubilidad en agua de los almidones de sorgo nativo y modificados se muestra en la Figura 11.

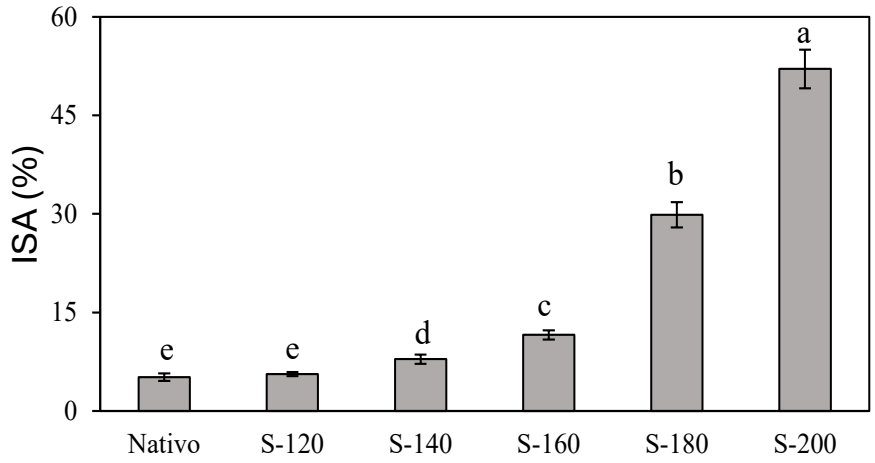


Figura 11. Índice de solubilidad de agua del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Aunque la solubilidad del almidón está más asociada con la lixiviación de la amilosa, en algunos casos, dependiendo de la intensidad del tratamiento térmico o del proceso de modificación utilizados, segmentos lineales de amilopectina también pueden ser liberados al medio acuoso (Biliaderis, 2009). En la Figura 11 podemos observar que el índice de solubilidad en agua se modificó de manera significativa debido al tratamiento de calor seco a partir de 140 ºC. El incremento en esta propiedad se hizo particularmente notorio a 180 y 200 ºC. El almidón nativo presentó un valor de solubilidad de 5.15 %, el cual se incrementó a valores en el rango de 7.9 - 52.0 %, observándose el mayor valor a 200 ºC.

Los resultados de solubilidad indican que el proceso de calor seco mejoró dicha propiedad con respecto al almidón nativo. Esto indicaría una mayor disponibilidad de segmentos lineales, principalmente amilosa, disponibles para solubilizarse debido al daño por el tratamiento térmico. Derivado de esto, se hipotetizaría que el calor seco tendría un efecto importante en las regiones amorfas del gránulo como mencionaron Velazquez y col. (2025), dejando más disponible a la amilosa para que durante el calentamiento en presencia de agua esta pueda lixiviarse más fácilmente. Este proceso se intensificaría conforme se incrementa la intensidad del tratamiento de calor seco.

Adicionalmente, es importante destacar que el incremento en los valores de dicha propiedad es bastante notorio después del tratamiento a 180 y 200 ºC, lo que puede implicar daño térmico en la estructura de la amilopectina, permitiendo la liberación de segmentos lineales cortos al medio acuoso y contribuyendo también al incremento de los valores de solubilidad en agua (Biliaderis, 2009). Otro aspecto interesante es que los poros, grietas y otros defectos superficiales causados por el calor seco facilitarían el desprendimiento de segmentos lineales desde el gránulo hacia el medio acuoso, contribuyendo también al incremento de la solubilidad (Zhang y col., 2021b). Los resultados de índice de solubilidad en agua obtenidos en este estudio son similares a los reportados para almidones de maíz (Lei y col., 2020), quinoa (Zhou y col., 2021) y taro (Hui y col., 2024) modificados por calor seco. Los resultados de la propiedad de poder de hinchamiento se muestran en la Figura 12.

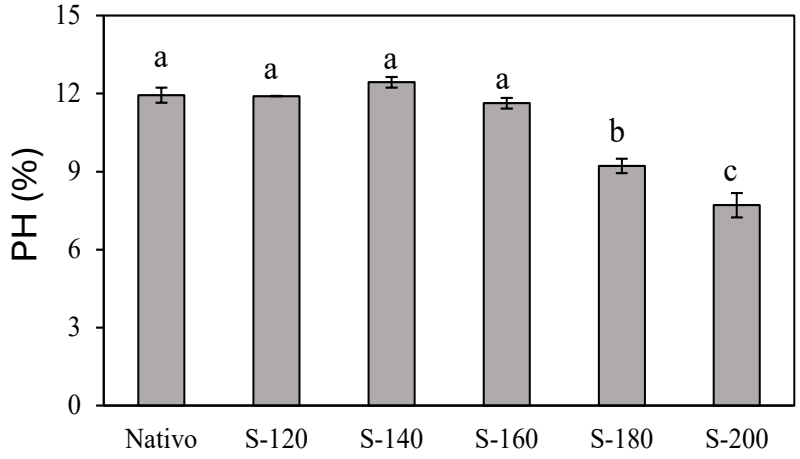


Figura 12. Poder de hinchamiento del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Esta propiedad se relaciona con la capacidad de la amilopectina de funcionar como una red estructural para atrapar agua, incrementando varias veces el tamaño del gránulo en presencia de calor (Wang y Copeland, 2015). Durante el calentamiento, las cadenas de almidón se abren, permitiendo la combinación de moléculas de agua con los grupos hidroxilo libres de las cadenas, dando lugar al hinchamiento (Jia y

col., 2023). De acuerdo con la Figura 12, el poder de hinchamiento no se modificó por el tratamiento a 120, 140 y 160 ºC, lo que indicaría poca afectación en la estructura ramificada de la amilopectina, siendo esta necesaria para la formación de la red estructural capaz de atrapar agua.

Sin embargo, sí se observaron cambios significativos a 180 ºC y 200 ºC. El valor de hinchamiento del almidón nativo fue de 11.94 %, reduciéndose hasta 9.21 y 7.71 % a 180 y 200 °C, respectivamente. Las diferencias significativas observadas después del tratamiento a altas temperaturas implicarían daños en la estructura de la amilopectina. Como se mencionó anteriormente, la propiedad de hinchamiento en los gránulos de almidón se atribuye principalmente a la estructura intacta de la amilopectina, por lo que es muy viable que el tratamiento térmico haya ocasionado la fragmentación de esta, disminuyendo su capacidad de incrementar su volumen al captar agua (Wang y Copeland, 2015).

Estos resultados son consistentes con el incremento drástico de la solubilidad en agua a 180 y 200 ºC. La disminución del poder de hinchamiento también fue observada para almidones de camote (Gou y col., 2019), quinoa (Zhou y col., 2021) y taro (Hui y col., 2024) modificados por calor seco.

V.6 Capacidad de absorción de agua y de aceite del almidón de sorgo

Las propiedades de absorción de agua de los almidones de sorgo nativo y modificados se muestran en la Figura 13.

La capacidad de absorción de agua en el almidón está relacionada con el orden estructural, el cual puede restringir su acceso o permitir su entrada dependiendo de su grado de organización (Zhang y col., 2024a). Al entrar en contacto, las moléculas de agua pasan a través de la superficie de los gránulos de almidón hacia su interior, hasta eventualmente alcanzar las regiones amorfas para hidratarlas (Zhang y col., 2024b).

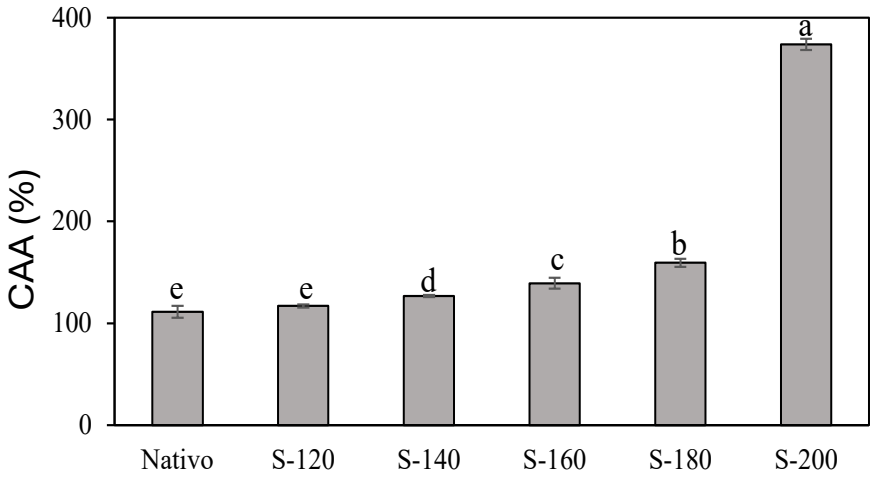


Figura 13. Capacidad de absorción de agua del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

De acuerdo con la Figura 13, se puede observar que la propiedad de absorción de agua incrementó significativamente en función de la temperatura, pasando de un valor de 111.33 % en el almidón nativo de sorgo hasta valores en el rango de 116.94 - 373.88 % en los almidones modificados. El valor mayor se observó a 200 ºC.

Los resultados anteriores pueden ser atribuidos a cambios en el orden estructural del almidón de sorgo derivados del tratamiento de calor seco, incluyendo aspectos morfológicos así como de cristalinidad y de dobles hélices. Por ejemplo, de acuerdo con las micrografías de MEB, la presencia de grietas, poros u otro tipo de daño superficial permitiría un mayor acceso de moléculas de agua hacia el interior de los gránulos. Adicionalmente, cambios en la estructura interna del gránulo, como los observados en la debilitada estructura cristalina (Figura 8) y de dobles hélices (Cuadro 2), permitirían su acceso y posterior retención en sitios hidrofílicos disponibles, representados por los grupos hidroxilo de las cadenas de almidón. El incremento en esta propiedad también se observó para almidón de maíz modificado por calor seco (Zou y col., 2020). La capacidad de absorción de aceite de los almidones se muestra en la Figura 14.

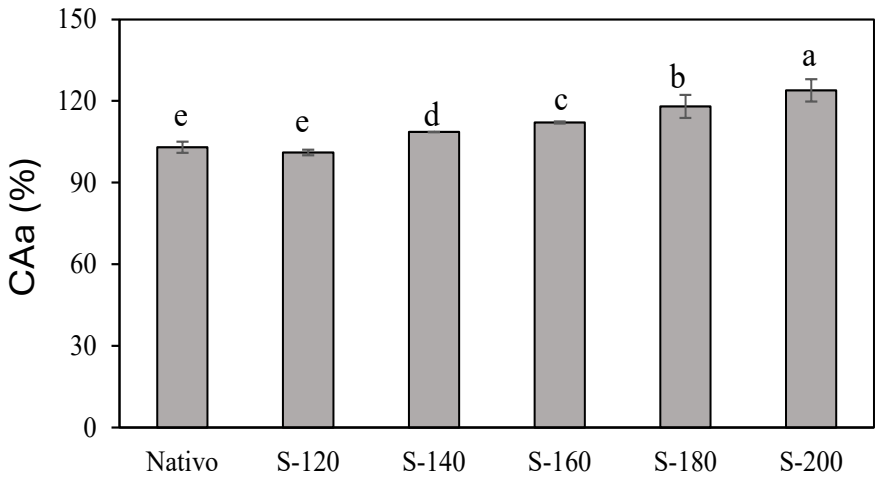


Figura 14. Capacidad de absorción de aceite del almidón de sorgo nativo y modificados por calor seco a 120, 140, 160, 180 y 200 °C.

Esta propiedad está relacionada con la asociación entre lípidos y moléculas de almidón mediante interacciones hidrofóbicas, así como con afectaciones en el orden estructural de los gránulos (Ashwar y col., 2016). La capacidad de absorción de aceite del almidón se da inicialmente por su entrada a través de los poros y canales presentes en los gránulos; después, el grado de orden de la estructura interna determina su distribución y finalmente, las moléculas de aceite interactúan con sitios lipofílicos existentes en las cadenas de almidón (Zhang y col., 2026). De acuerdo con la Figura 14, se encontró que la capacidad de absorción de aceite se incrementó significativamente en función de la temperatura, de manera similar a lo ocurrido con la capacidad de absorción de agua. Sin embargo, no se observó diferencia significativa entre el almidón nativo y el modificado a 120 ºC. El incremento se evidenció desde un valor de 102.9 % en el almidón nativo hasta valores en el rango de 108.6 - 123.8 %, observándose el valor más alto también a 200 ºC.

El incremento observado en esta propiedad puede atribuirse a tres eventos principales. El primero de ellos estaría relacionado con las modificaciones morfológicas en el gránulo, más específicamente la aparición de fisuras y poros. Estos defectos superficiales permitirían el acceso de las moléculas de aceite al

interior del gránulo (Zhang y col., 2026). El segundo evento estaría relacionado con la distribución de las moléculas de aceite en el interior del gránulo, debido a la frágil estructura cristalina y de dobles hélices. Finalmente, la exposición de más regiones hidrofóbicas en el gránulo después del tratamiento de calor seco, derivadas de la desorganización de las regiones cristalinas y de dobles hélices, proporcionaría más sitios que podrían interactuar con las moléculas de aceite (Ashwar y col., 2016). De manera similar con las propiedades de retrogradación, no se identificaron estudios previos en los que se reportaran las propiedades de absorción de aceite posterior al tratamiento por calor seco, por lo que el análisis de estas podría representar una perspectiva de investigación interesante para desarrollar el potencial tecnológico del calor seco en la modificación de almidones.

V.7 Relación entre estructura y funcionalidad del almidón de sorgo modificado por calor seco

Con el objetivo de establecer las relaciones entre las características estructurales y las propiedades funcionales del almidón de sorgo modificado por calor seco, se realizó un análisis de correlaciones. Los coeficientes de correlación de Pearson se muestran en el Cuadro 4.

Las temperaturas de transición (T_i, T_p y T_c) del evento de gelatinización se correlacionaron (r = 0.79, 0.83 y 0.72, respectivamente) con las características estructurales, principalmente con la CR, lo que indica que la disminución de la cristalinidad del almidón de sorgo (Figura 8) después del tratamiento de calor seco influye en la disminución de su estabilidad térmica (Cuadro 3). Sin embargo, la desorganización de la estructura de dobles hélices (Cuadro 2) también contribuyó a la obtención de almidones de sorgo modificados con menor estabilidad térmica (Cuadro 3).

Por otra parte, con respecto al evento de retrogradación, solo la T_i se asoció con los aspectos estructurales de manera negativa, indicando que la disminución de la cristalinidad (r = -0.70) (Figura 8) y del orden (r = -0.80) y grado de dobles hélices (r = -0.81) (Cuadro 2) después de la aplicación del calor seco, derivó en almidones de

sorgo modificados con mayor estabilidad térmica después de la retrogradación (Cuadro 3).

Cuadro 4. Análisis de correlaciones de los parámetros estructurales y funcionales del almidón de sorgo modificado por calor seco.

Parámetro	*CR (%)*	*DD*	*DO*
CR (%)	1.00		
DD	0.86	1.00	
DO	0.85	0.99	1.00
Ti (°C)	0.79	0.73	0.72
Tp (°C)	0.83	0.77	0.77
Tc (°C)	0.72	0.58	0.61
ΔT (°C)	-0.51	-0.76	-0.65
ΔH (J/g)	0.64	0.71	0.67
Ti (r) (°C)	-0.70	-0.81	-0.80
Tp (r) (°C)	0.42	-0.03	-0.04
Tc (r) (°C)	0.53	0.41	0.30
ΔT (r) (°C)	0.70	0.75	0.71
ΔH (r) (J/g)	0.28	0.51	0.46
ISA (%)	-0.90	-0.73	-0.72
PH (g/g)	0.85	0.66	0.64
CAA (%)	-0.83	-0.63	-0.60
CAa(%)	-0.89	-0.91	-0.90

Con respecto al ΔT (Cuadro 3), se correlacionó de manera inversa (r = -0.76) y directa (r = 0.75) con los aspectos estructurales para los eventos de gelatinización y retrogradación, respectivamente, mientras que el ΔH (r = 0.71) (Cuadro 3) solo se correlacionó con la desorganización estructural en el evento de gelatinización.

Además de las propiedades térmicas, las propiedades de solubilidad, hinchamiento y capacidad de absorción de agua o de aceite también se correlacionaron con las características estructurales del almidón de sorgo modificado por calor seco. El índice de solubilidad en agua (Figura 11) se correlacionó de manera inversa con la cristalinidad relativa (r = -0.90) (Figura 8) y con el grado (r = -0.73) y el orden (r = -0.72) de dobles hélices (Cuadro 2), lo que indica que la pérdida del orden estructural ocasionada por el tratamiento de calor seco contribuyó a la liberación de segmentos

lineales del almidón, incrementando los valores de solubilidad. Asimismo, la pérdida del orden estructural derivó en una menor capacidad de hinchamiento (Figura 12), ya que dicho orden es necesario para el atrapamiento de agua y el incremento del volumen de los gránulos de almidón.

La capacidad de absorción de moléculas con distinta polaridad, como el agua y el aceite, también se correlacionó de manera inversa con la cristalinidad relativa (r = -0.83 y -0.89), con el grado (r = -0.63 y -0.91) y con el orden (r = -0.60 y -0.90) de dobles hélices. Lo anterior refleja que la pérdida del orden estructural permitió el acceso, la distribución y la retención de dichas moléculas al interior del gránulo, incrementando los valores de capacidad de absorción de agua y de aceite (Figura 13 y 14). La capacidad de absorción de agua se correlacionó inversamente más fuertemente con la cristalinidad relativa, mientras que la capacidad de absorción de aceite lo hizo con el grado y orden de dobles hélices.

V.8 Potencial mecanismo de modificación del almidón de sorgo por calor seco.

Con los datos obtenidos, es posible proponer un potencial mecanismo de modificación del almidón de sorgo mediante el proceso de calor seco. El mecanismo podría enlistarse como sigue: a) afectación de la superficie y morfología granular, que va desde la retención de las características nativas hasta la formación de poros, grietas y conglomerados de gránulos, debido a la lixiviación de la amilosa y evaporación de moléculas de agua; y b) desorganización del orden cristalino junto con la disrupción de la estructura de dobles hélices, mediante la interrupción de puentes de hidrógeno entre ellas. Estos cambios estructurales, que se hicieron más evidentes conforme se incrementó la temperatura, se manifestaron en efectos en la funcionalidad, como disminución de las propiedades de gelatinización, modificaciones en las de retrogradación, incremento de la solubilidad en agua, disminución del hinchamiento y mejora de la capacidad de absorción de agua y aceite. Lo anterior indica que el almidón de sorgo modificado por calor seco podría utilizarse para diferentes aplicaciones alimentarias.

V.9 Potenciales aplicaciones del almidón de sorgo modificado por calor seco

La aplicación de calor seco al almidón de sorgo modificó sus propiedades, incluyendo: a) disminución de las propiedades de gelatinización, b) mejora de la estabilidad térmica después de la retrogradación, c) incremento de la solubilidad, d) disminución del poder de hinchamiento, así como e) mayor capacidad de absorción de agua y aceite. De esta manera, diversas potenciales aplicaciones alimentarias pueden ser propuestas para el almidón de sorgo modificado por este método ecológico. El almidón de sorgo modificado por calor seco a 200 °C fue el que presentó la mayor versatilidad en cuanto a la mejora de propiedades, como mayor índice de solubilidad, menor temperatura de gelatinización e incremento en la capacidad de absorber agua y aceite.

Almidones modificados con bajas temperaturas de gelatinización pueden ser útiles para la incorporación en productos que requieren procesamiento térmico a temperaturas moderadas o cocción rápida, así como también para mejorar la digestibilidad de otros, como por ejemplo, los destinados a alimentación animal (Liu y col., 2019). Por otra parte, el potencial del calor seco para influir en la retrogradación del almidón de sorgo, podría abrir un panorama para explorar la producción de almidón resistente, una fracción de almidón con resistencia a la digestión enzimática con propiedades nutracéuticas que puede obtenerse a partir de la reorganización del almidón gelatinizado (Tacer-Caba y Nilufer-Erdil, 2019).

Con respecto a la mejora del índice de solubilidad en agua, esta propiedad podría aprovecharse para la obtención de películas biodegradables, ya que se requiere para liberar los componentes y, posteriormente, permitir la formación de una matriz estructural continua (Zhang y col., 2019). Las películas biodegradables permiten la conservación e incrementan la vida de anaquel de productos perecederos. La disminución del poder de hinchamiento podría aprovecharse para incorporar almidón modificado en alimentos y reducir su digestibilidad, al crear una barrera a la actividad enzimática (Jia y col., 2023).

Finalmente, las propiedades mejoradas de absorción de agua se pueden aprovechar para la preparación de productos a base de pasta (Zhang y col., 2024a), mientras que la propiedad aumentada de absorber aceite se puede canalizar a la

preparación de sustitutos de grasa en productos de repostería o cárnicos (Zhang y col., 2026).

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó el efecto del tratamiento de calor seco en las características morfológicas, de cristalinidad y de dobles hélices, así como también en la funcionalidad del almidón de sorgo.

El tratamiento de calor seco provocó defectos en la microestructura, la disminución de la cristalinidad y la desorganización de la estructura de dobles hélices, con un efecto más evidente con el incremento en la temperatura de tratamiento.

Los cambios estructurales derivaron en la disminución de las propiedades de gelatinización y del poder de hinchamiento, pero incrementaron la solubilidad en agua y las propiedades de absorción de agua y de aceite, con efecto significativo por el incremento de la temperatura de tratamiento.

Los resultados de la presente investigación indican que el almidón de sorgo modificado por calor seco presenta potencial para su empleo en diversas aplicaciones alimentarias, incluyendo almidón resistente, películas biodegradables, productos a base de pasta, repostería y cárnicos, en función de la temperatura de modificación empleada. Investigaciones a futuro podrían centrarse en explorar la posible formación de poros o canales internos en los gránulos de almidón de sorgo, así como también los efectos en las características moleculares ocasionados por el calor seco. Por otra parte, el estudio del impacto de los almidones modificados de sorgo en matrices alimentarias reales podría ser también otra perspectiva de investigación relevante.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Ameen, M., Mahmood, A., Shahzad, A. N., Zia, M. A., & Javaid, M. M. (2024). Sorghum's potential unleashed: A comprehensive exploration of bio-energy production strategies and innovations. *Bioresource Technology Reports*, *27*, 101906. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101906

Apriyanto, A., Compart, J., & Fettke, J. (2022). A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*, *318*, 111223. https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2022.111223

Ashwar, B. A., Gani, A., Wani, I. A., Shah, A., Masoodi, F. A., & Saxena, D. C. (2016). Production of resistant starch from rice by dual autoclaving-retrogradation treatment: Invitro digestibility, thermal and structural characterization. *Food Hydrocolloids*, *56*, 108–117. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.004

Astuti, R. M., Widaningrum, Asiah, N., Setyowati, A., & Fitriawati, R. (2018). Effect of physical modification on granule morphology, pasting behavior, and functional properties of arrowroot (Marantha arundinacea L) starch. *Food Hydrocolloids*, *81*, 23–30. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.02.029

Banerjee, R., & Kumar, K. J. (2024). Evaluating the effects of time-dependent drying and pressure heat treatments on the variation of physicochemical and rheological properties of suran starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *263*, 130071. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130071

Biliaderis, C. G. (2009). Structural Transitions and Related Physical Properties of Starch. *Starch*, 293–372. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00008-2

Chen, P., Xie, F., Zhao, L., Qiao, Q., & Liu, X. (2017). Effect of acid hydrolysis on the multi-scale structure change of starch with different amylose content. *Food Hydrocolloids*, *69*, 359–368. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2017.03.003

Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, *23*(6), 1527–1534. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2008.09.016

de Oliveira Maior, L., Bach, D., Demiate, I. M., & Lacerda, L. G. (2024). Impact of cyclic and continuous dry heat modification on the structural, thermal, technological, and in vitro digestibility properties of potato starch (Solanum tuberosum L.): A comparative study. *International Journal of Biological Macromolecules*, *263*, 130370. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130370

Dominguez-Ayala, J. E., Ayala-Ayala, M. T., Velazquez, G., Espinosa-Arbelaez, D. G., & Mendez-Montealvo, G. (2023). Crystal structure changes of native and retrograded starches modified by high hydrostatic pressure: Physical dual modification. *Food Hydrocolloids*, *140*, 108630. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2023.108630

Epp, J. (2016). X-Ray Diffraction (XRD) Techniques for Materials Characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 81–124. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3

Fonseca-Florido, H. A., Méndez-Montealvo, G., Velazquez, G., & Gómez-Aldapa, C. A. (2016). Thermal study in the interactions of starches blends: Amaranth and achira. *Food Hydrocolloids*, *61*, 640–648. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2016.06.027

Gautam, N., Garg, S., & Yadav, S. (2024). Dry Heat Treatment of Finger Millet Starch for Thin Films—Studies on Physicochemical, Mechanical, and Barrier Properties. *Starch/Staerke*, *76*(11–12), 2300097. https://doi.org/10.1002/star.202300097

Gou, M., Wu, H., Saleh, A. S. M., Jing, L., Liu, Y., Zhao, K., Su, C., Zhang, B., Jiang, H., & Li, W. (2019). Effects of repeated and continuous dry heat treatments on properties of sweet potato starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *129*, 869–877. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.01.225

Haziman, M. L., Ishaq, M. I., Qonit, M. A. H., Lestari, E. G., Susilawati, P. N., Widarsih, W., Syukur, C., Herawati, H., Arief, R., Santosa, B., Purba, R., Andoyo, R., Yursak, Z., Tan, S. S., Musfal, M., & Mubarok, S. (2025). Sorghum starch review: Structural properties, interactions with proteins and polyphenols, and modification of physicochemical properties. *Food Chemistry*, *463*, 139810. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2024.139810

Hui, G., Zhu, P., & Wang, M. (2024). Structure and functional properties of taro starch modified by dry heat treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, *261*, 129702. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.129702

Jafari, M., & Koocheki, A. (2024). Impact of ultrasound treatment on the physicochemical and rheological properties of acid hydrolyzed sorghum starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *256*, 128521. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128521

Jia, R., Cui, C., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., Wang, Y., Xiong, L., Shi, R., & Sun, Q. (2023). A review of starch swelling behavior: Its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality. *Carbohydrate Polymers*, *321*, 121260. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.121260

Joye, I. J. (2019). Starch. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 256–264. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21586-2

Kumari, B., & Sit, N. (2023). Comprehensive review on single and dual modification of starch: Methods, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*, 126952. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126952

La Fuente, C. I. A., do Val Siqueira, L., Augusto, P. E. D., & Tadini, C. C. (2022). Casting and extrusion processes to produce bio-based plastics using cassava starch

modified by the dry heat treatment (DHT). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *75*, 102906. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102906

Lei, N., Chai, S., Xu, M., Ji, J., Mao, H., Yan, S., Gao, Y., Li, H., Wang, J., & Sun, B. (2020). Effect of dry heating treatment on multi-levels of structure and physicochemical properties of maize starch: A thermodynamic study. *International Journal of Biological Macromolecules*, *147*, 109–116. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.01.060

Liang, S., Su, C., Saleh, A. S. M., Wu, H., Zhang, B., Ge, X., & Li, W. (2021). Repeated and continuous dry heat treatments induce changes in physicochemical and digestive properties of mung bean starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(3), e15281. https://doi.org/10.1111/jfpp.15281

Liu, Y., Yu, J., Copeland, L., Wang, S., & Wang, S. (2019). Gelatinization behavior of starch: Reflecting beyond the endotherm measured by differential scanning calorimetry. *Food Chemistry*, *284*, 53–59. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.01.095

Lopez-Rubio, A., Flanagan, B. M., Gilbert, E. P., & Gidley, M. J. (2008). A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content: a combined XRD and NMR study. *Biopolymers*, *89*(9), 761–768. https://doi.org/10.1002/BIP.21005

Maniglia, B. C., Lima, D. C., Matta Junior, M. D., Le-Bail, P., Le-Bail, A., & Augusto, P. E. D. (2020). Preparation of cassava starch hydrogels for application in 3D printing using dry heating treatment (DHT): A prospective study on the effects of DHT and gelatinization conditions. *Food Research International*, *128*, 108803. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.108803

Ogunsona, E., Ojogbo, E., & Mekonnen, T. (2018). Advanced material applications of starch and its derivatives. *European Polymer Journal*, *108*, 570–581. https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2018.09.039

Oh, I. K., Bae, I. Y., & Lee, H. G. (2018). Effect of dry heat treatment on physical property and in vitro starch digestibility of high amylose rice starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *108*, 568–575. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.11.180

Pandey, A. K., Thakur, S., & Yadav, D. K. (2023). Dry Heat Treatment of Starch. *Starch: Advances in Modifications, Technologies and Applications*, 151–171. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35843-2_7

Pedrosa Silva Clerici, M. T., Sampaio, U. M., & Schmiele, M. (2019). Identification and Analysis of Starch. *Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties*, 23–69. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00002-2

Pfister, B., & Zeeman, S. C. (2016). Formation of starch in plant cells. *Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS*, *73*(14), 2781. https://doi.org/10.1007/S00018-016-2250-X

Punia, S. (2020). Barley starch modifications: Physical, chemical and enzymatic - A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *144*, 578–585. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.12.088

Qiao, D., Wang, Z., Li, H., Zhang, B., Pu, H., Jiang, F., & Zhao, S. (2020). Supramolecular and molecular structures of potato starches and their digestion features. *International Journal of Biological Macromolecules*, *152*, 939–947. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.214

Qiu, C., Cao, J., Xiong, L., & Sun, Q. (2015). Differences in physicochemical, morphological, and structural properties between rice starch and rice flour modified by dry heat treatment. *Starch - Stärke*, *67*(9–10), 756–764. https://doi.org/10.1002/STAR.201500016

Roozeboom, K. L., & Prasad, P. V. V. (2019). *Sorghum Growth and Development*. 155–172. https://doi.org/10.2134/agronmonogr58.c8

Serna-Saldivar, S. O., & Espinosa-Ramírez, J. (2019). Grain Structure and Grain Chemical Composition. *Sorghum and Millets: Chemistry, Technology, and Nutritional Attributes*, 85–129. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00005-8

Shah, A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Ashwar, B. A. (2016). In-vitro digestibility, rheology, structure, and functionality of RS3 from oat starch. *Food Chemistry*, *212*, 749–758. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.06.019

Shaikh, M., Ali, T. M., Shaikh, F., Butt, N. A., & Haider, S. (2024). Sorghum starch: functionality and potential applications. *Non-Conventional Starch Sources: Properties, Functionality, and Applications*, 125–157. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18981-4.00005-7

Tacer-Caba, Z., & Nilufer-Erdil, D. (2019). Resistant Starch. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 571–575. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22407-4

Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, *39*(2), 151–165. https://doi.org/10.1016/J.JCS.2003.12.001

Velazquez, G., Mendez-Montealvo, G., Flores-Silva, P. C., & Soler, A. (2025). Multi-Scale Structures, Functional Properties, and Applications of Starch Modified by Dry Heat Treatment. *Biopolymers*, *116*(2), e70000. https://doi.org/10.1002/bip.70000

Wang, S., & Copeland, L. (2013). Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: a review. *Food & Function*, *4*(11), 1564–1580. https://doi.org/10.1039/C3FO60258C

Wang, S., & Copeland, L. (2015). Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *55*(8), 1081–1097. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.684551

Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *14*(5), 568–585. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143;JOURNAL:JOURNAL:15414337;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Warren, F. J., Gidley, M. J., & Flanagan, B. M. (2016). Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydrate Polymers*, *139*, 35–42. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2015.11.066

Xiong, Y., Zhang, P., Warner, R. D., & Fang, Z. (2019). Sorghum Grain: From Genotype, Nutrition, and Phenolic Profile to Its Health Benefits and Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *18*(6), 2025–2046. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12506

Yang, J., Xie, F., Wen, W., Chen, L., Shang, X., & Liu, P. (2016). Understanding the structural features of high-amylose maize starch through hydrothermal treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, *84*, 268–274. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2015.12.033

Zhang, J., Ran, C., Jiang, X., & Dou, J. (2021a). Impact of octenyl succinic anhydride (OSA) esterification on microstructure and physicochemical properties of sorghum starch. *Food Science and Technology*, 151, 112111.

Zhang, B., Zhang, Q., Wu, H., Su, C., Ge, X., Shen, H., Han, L., Yu, X., & Li, W. (2021b). The influence of repeated versus continuous dry-heating on the performance of wheat starch with different amylose content. *LWT*, *136*, 110380. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110380

Zhang, H., Hou, H., Liu, P., Wang, W., & Dong, H. (2019). Effects of acid hydrolysis on the physicochemical properties of pea starch and its film forming capacity. *Food Hydrocolloids*, *87*, 173–179. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.08.009

Zhang, J., Li, Y., Tang, J., Zhang, Y., Wang, X., Yu, L., Tao, L., Song, S., & Xiong, B. (2026). Oil absorption capacity of starch: From mechanism, evaluating methods, directional modification to food applications. *Carbohydrate Polymers*, *373*, 124688. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2025.124688

Zhang, J., Tao, L., Yang, S., Li, Y., Wu, Q., Song, S., & Yu, L. (2024a). Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications. *Trends in Food Science & Technology*, *144*, 104321. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.104321

Zhang, R., Yu, J., Zhang, S., Hu, Y., Liu, H., Liu, S., Wu, Y., Gao, S., & Pei, J. (2024b). Effects of repeated and continuous dry heat treatments on the physicochemical, structural, and in vitro digestion properties of chickpea starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *271*, 132485. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.132485

Zhou, Y. li, Cui, L. hua, You, X. yong, Jiang, Z. hui, Qu, W. hao, Liu, P. deng, Ma, D. yu, & Cui, Y. ying. (2021). Effects of repeated and continuous dry heat treatments on the physicochemical and structural properties of quinoa starch. *Food Hydrocolloids*, *113*, 106532. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106532

Zou, J., Xu, M., Tang, W., Wen, L., & Yang, B. (2020). Modification of structural, physicochemical and digestive properties of normal maize starch by thermal treatment. *Food Chemistry*, *309*, 125733. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125733

Zou, J., Xu, M., Tian, J., & Li, B. (2019). Impact of continuous and repeated dry heating treatments on the physicochemical and structural properties of waxy corn starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *135*, 379–385. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.147