



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A.C.**

**PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, FUNCIONALES,
REOLÓGICAS Y DE TEXTURA DE ALMIDONES NATIVOS Y
RESISTENTES OBTENIDOS DE MAÍZ, MANZANA Y
MALANGA**

Por:

Viridiana Aguilar Mendoza

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN DE FISIOLÓGÍA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA ZONA
TEMPLADA

Como requisito parcial para obtener el grado de

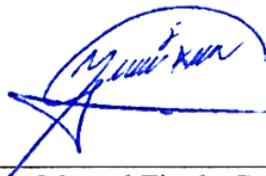
MAESTRA EN CIENCIAS

APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Viridiana Aguilar Mendoza la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias.



Dr. Paul Baruk Zamudio Flores
Director de Tesis



Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos
Integrante del Comité de Tesis



Dr. Claudio Rios Velasco
Integrante del Comité de Tesis



M.C. Francisco Javier Molina Corral
Integrante del Comité de Tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis “Propiedades Físicoquímicas, Funcionales, Reológicas y de Textura de Almidones Nativos y Resistentes Obtenidos de Maíz, Manzana y Malanga” es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial de la autora Viridiana Aguilar Mendoza, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director(a) de tesis.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.
Coordinación de Programas Académicos

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pablo Wong Gonzalez", is written over a horizontal line.

Dr. Pablo Wong Gonzalez
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad y apoyo económico brindado para la realización de mis estudios y la obtención del grado de Maestra en Ciencias.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), por el apoyo profesional del personal que orientó mi formación y por los materiales y equipos para la realización de mi trabajo de investigación.

Al Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT S0007-2016-01, por financiar el presente trabajo, el cual forma parte del proyecto titulado: “Desarrollo de tecnologías para el uso y aprovechamiento de cormos de malanga (*Xanthosoma sagittifolium*) del estado de Chiapas y Veracruz”, con clave S0007-2016-01.

Al Dr. Paul Baruk Zamudio Flores, por haberme permitido ser parte de su equipo de trabajo y por haberme inculcado la disciplina de trabajo.

Al Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos, por su paciencia, tiempo y apoyo brindados, los cuales fueron pieza clave para poder llevar a cabo este proyecto. Gracias.

Al Ing. Arturo Ramos Martínez por su apoyo técnico en el laboratorio.

En especial a Ndahita de Dios Ávila por su apoyo y ayuda en la realización del trabajo experimental.

A mis compañeros de clase, Alejandro de la Peña, Gabriela Armendáriz y Angélica Rivera, por el apoyo y por siempre ser un grupo unido.

Así como a la comunidad CIAD, unidad Cuauhtémoc, por su amistad.

A Dios por bendecirme la vida, por guiarme y ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

DEDICATORIA

*Dedico este proyecto de tesis de grado a mis padres, **María I. Mendoza Rascón** y **Héctor L. Aguilar Arias** y a mi hermana **Melissa Aguilar**, por su apoyo incondicional, amor y confianza, los cuales me permitieron obtener una formación profesional y terminar con éxito esta maestría.*

Viridiana Aguilar Mendoza

CONTENIDO

APROBACIÓN	2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE CUADROS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES	16
2.1. Manzana	16
2.1.1. Producción de Manzana.....	17
2.1.2. Aspectos Generales de la Manzana y Principales Componentes	18
2.1.3. Almidón Nativo de Manzana	19
2.1.4. Aspectos Fisicoquímicos del Almidón de Manzana.....	20
2.1.5. Aspectos Funcionales del Almidón de Manzana.....	21
2.1.6. Propiedades Térmicas del Almidón de Manzana	21
2.1.7. Aspectos Moleculares del Almidón de Manzana (FTIR)	22
2.1.8. Aspectos Reológicos del Almidón de Manzana.....	22
2.1.9. Modificaciones Físicas y Químicas en Almidón de Manzana	23
2.2. Malanga (<i>Xanthosoma sagittifolium</i>).....	23
2.2.1. Producción y Consumo de Malanga.....	24
2.2.2. Principales Componentes Nutritivos de la Malanga.....	25
2.2.3. Almidón Nativo de Malanga	26
2.2.4. Aspectos Fisicoquímicos del Almidón Nativo de Malanga.....	27
2.2.5. Aspectos Funcionales del Almidón Nativo de Malanga.....	28
2.2.6. Propiedades Térmicas del Almidón de Malanga.....	29
2.2.7. Aspectos Moleculares del Almidón de Malanga (FTIR).....	30
2.2.8. Estudios Reológicos del Almidón Nativo de Malanga.....	31
2.2.9. Modificaciones Físicas y Químicas en Almidón de Malanga.....	32
2.3. Almidón Resistente (AR)	34
2.3.1. Producción de AR.....	34
2.3.2. Efectos Fisiológicos del AR.....	35
2.3.3. Propiedades Fisicoquímicas del AR	37
2.3.4. Propiedades Funcionales del AR.....	38
2.3.5. Propiedades Térmicas del AR	39
2.3.6. Aspectos Moleculares (FTIR) del AR	40
2.3.7. Propiedades Reológicas del AR	41

CONTENIDO (continuación)

2.3.8. Aspectos Morfológicos (MEB) y Estructurales (Difracción de Rayos X) del AR.....	42
2.3.9. Propiedades de Textura del AR.....	43
3. JUSTIFICACIÓN.....	45
4. HIPÓTESIS	46
5. OBJETIVOS	47
5.1. Objetivo General.....	47
5.2. Objetivos Específicos.....	47
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
6.1. Materiales	48
6.2. Métodos	48
6.2.1. Obtención de Almidón de Manzana	48
6.2.2. Obtención de Almidón de Malanga a Partir de Harina.....	49
6.2.3. Obtención de Almidón Resistente Tipo 3.....	50
6.2.4. Obtención de almidón Resistente Tipo 4.....	50
6.2.5. Análisis Químico Proximal.....	50
6.2.6. Medición del Color.....	51
6.2.7. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido.....	51
6.2.8. Propiedades Fisicoquímicas	51
6.2.8.1. Contenido De Amilosa Aparente.	51
6.2.8.2. Determinación del peso molecular (PM).....	52
6.2.9. Propiedades Funcionales.....	52
6.2.9.1. Índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y poder de hinchamiento.	53
6.2.10. Determinaciones Enzimáticas del Almidón y sus Componentes	54
6.2.10.1. Almidón total (AT).....	54
6.2.10.2. Almidón disponible (AD).....	54
6.2.10.3. Almidón resistente (AR).....	55
6.2.10.4. Almidón resistente retrogradado (ARr).....	55
6.2.11. Análisis de Perfil de Textura (TPA)	56
6.2.12. Análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido.....	57
6.2.13. Análisis de Difracción de Rayos X.....	57
6.2.14. Análisis de Espectroscopía Infrarroja.....	58
6.2.15. Análisis de Reología	58
6.2.16. Análisis Estadístico.....	59
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
7.1. Análisis Químico Proximal	60
7.2. Determinación del Color	63
7.3. Estudios Morfológicos	66
7.4. Propiedades Fisicoquímicas	68
7.4.1. Contenido de Amilosa Aparente	68

CONTENIDO (continuación)

7.4.2. Determinación del Peso Molecular (PM)	70
7.5. Propiedades Funcionales	72
7.5.1. Índice de Solubilidad	72
7.5.2. Índice de Absorción de Agua.....	75
7.5.3. Poder de Hinchamiento.....	78
7.6. Determinaciones Enzimáticas.....	81
7.6.1. Almidón Total (AT).....	81
7.6.2. Almidón Disponible (AD)	81
7.6.3. Almidón Resistente (AR).....	82
7.6.4. Almidón Resistente Retrogradado (ARr).....	83
7.7. Análisis de Perfil de Textura (TPA).....	85
7.8. Análisis Térmico.....	89
7.9. Análisis Estructurales (Difracción De Rayos X) y % de Cristalinidad.....	91
7.10. Análisis Moleculares (FTIR).....	97
7.11. Análisis Reológicos.....	101
8. CONCLUSIONES	109
9. RECOMENDACIONES.....	112
10. REFERENCIAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1	Microscopia electrónica de barrido de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 68
2	Índice de solubilidad de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 74
3	Índice de absorción de agua de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 77
4	Poder de hinchamiento de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 80
5	Ángulo de difracción de rayos X de almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 95
6	Espectros de-convulados de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana 99
7	Índice de cristalinidad ($1047/1022\text{ cm}^{-1}$) en almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana..... 100
8	Índice de comportamiento de flujo (n) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p) 102
9	Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 25 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p)... 103
10	Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 50 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p)... 104
11	Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 70 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p)... 105
12	Índice de consistencia (k) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5 % (p/p) 108

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Principales estados de la República Mexicana productores de manzana.....	17
2	Posicionamiento y producción de manzana de los principales estados de la República Mexicana	18
3	Análisis químico proximal (%) de almidones nativos y modificados de maíz, manzana y malanga.....	62
4	Variables de color de almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.....	65
5	Determinación del porcentaje de amilosa y peso molecular de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.....	71
6	Determinaciones enzimáticas (%) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.....	85
7	Análisis de perfil de textura de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.....	88
8	Temperaturas de transición y entalpía de gelatinización de almidones nativos y modificados de maíz, manzana y malanga.....	91
9	Porcentaje de cristalinidad de almidones nativos, autoclaveados y lintnerizados de maíz, malanga y manzana.....	96

RESUMEN

Se obtuvo almidón resistente tipo 3 (AR3) y 4 (AR4) por los tratamientos físicos de autoclaveado y químico de hidrólisis ácida (lintnerización), respectivamente, a partir de almidones nativos de maíz (N-MAÍZ), manzana (N-MANZ) y malanga (N-MAL). Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y de textura de los almidones nativos y sus respectivos AR. El N-MAÍZ y N-MAL mostraron formas poliédricas, y el N-MANZ redondas y domo; sin embargo, la morfología de los gránulos en los AR3 se afectó por el tratamiento de autoclaveado. El contenido de amilosa en N-MAÍZ, N-MAL y N-MANZ fue de 28.6, 29.5 y 27.4% respectivamente. El índice de solubilidad de los almidones nativos fue menor que en los AR, y conforme a la temperatura, este aumentó en las muestras nativas y AR4. El índice de absorción de agua (IAA), en los AR3 y AR4 a 70 y 80 °C, fueron menores que los nativos. El poder de hinchamiento incrementó conforme a la temperatura, mientras que con las modificaciones este se vio disminuido. De acuerdo con la determinación de almidón resistente, se obtuvieron incrementos significativos de AR en todas las muestras después de someterse al autoclaveado y lintnerización. El N-MANZ y N-MAÍZ presentaron la mayor dureza, mientras que los AR3 y AR4 exhibieron la menor dureza, masticabilidad y gomosidad. En relación a las propiedades térmicas, las entalpías en AR4 de maíz y malanga disminuyeron, mientras que en AR4-MANZ aumentaron; sin embargo, en los AR3 no se presentaron temperaturas de transición, independientemente de la fuente botánica. En difracción de rayos X, el N-MAÍZ y N-MAL presentaron un patrón tipo A, y el N-MANZ tipo B, el cual solo fue afectado por el autoclaveado. En los espectros de-convulados de FTIR, el índice de cristalinidad fue mayor para los almidones nativos y AR4; mientras que en los AR3 dicha proporción disminuyó significativamente. Por su parte, las propiedades reológicas de todos los almidones indicaron comportamientos de fluidos no-Newtonianos del tipo pseudoplástico. Para lo cual, se concluye que la malanga y las manzanas (inmaduras) pueden ser una fuente no convencional alternativa para disminuir las demandas comerciales de los almidones convencionales, con propiedades de interés tecnológico específicas.

Palabras clave: malanga, manzana, maíz, AR3, AR4, almidón, lintnerización, autoclaveado.

ABSTRACT

Type 3 (RS3) and type 4 (RS4) resistant starch was obtained by the physical autoclaving treatment and the acid hydrolysis (lintnerization) chemical treatment, respectively. RS3 and RS4 were obtained from native starches of corn (N-MAÍZ), apple (N-MANZ) and malanga (N-MAL). The physicochemical, functional, rheological and texture properties of native starches and their respective RS were evaluated. The N-MAIZ and N-MAL showed polyhedral shapes, and the N-MANZ round and dome, however, the morphology of the granules in the AR3 was affected by the autoclaved treatment. The amylose content in N-CORN, N-MAL and N-MANZ was 28.6, 29.5 and 27.4% respectively. The solubility index of the native starches was lower than in the RS, and according to the temperature, this increased in the native and AR4 samples. The water absorption index (IAA), in the RS3 and RS4 at 70 and 80 °C, were lower than the natives. The swelling power showed an increase according to the temperature, while with the modifications this was diminished. According to the determination of resistant starch, significant increases in RS were obtained in all samples when subjected to autoclaving and lintnerization treatments. The N-MANZ and N-MAÍZ showed the greatest hardness, while the RS3 and RS4 exhibited the lowest hardness, chewiness and rubberiness. In relation to thermal properties, enthalpies in corn and malanga RS4 decreased, while in RS4-MANZ they increased; however, in the RS3 there were no transition temperatures, regardless of the botanical source. In X-ray diffraction, the N-MAÍZ and N-MAL showed a type A pattern, and the N-MANZ type B, which was only affected by autoclaving. In the FTIR deconvoluted spectra, the crystallinity index was higher for native starches and RS4; while in the RS3 this proportion decreased significantly. On the other hand, the rheological properties of all starches indicated behaviors of non-Newtonian fluids of the pseudoplastic type. To this end, it is concluded that malanga and apples (immature) can be an alternative unconventional source to reduce the commercial demands of conventional starches, with specific technological interest properties.

Keywords: malanga, apple, corn, RS3, RS4, starch, lintnerization, autoclaving.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace poco tiempo, se pensaba que todo el almidón era digerido por las enzimas digestivas; sin embargo, estudios han corroborado que existe una parte (o fracción) que resiste el ataque enzimático, la cual se denomina almidón resistente (AR) (Englyst *et al.*, 1992).

El AR presenta propiedades fisicoquímicas y funcionales análogas a la fibra dietaria, con la ventaja de que cuando resiste el ataque enzimático, llega a la parte del intestino grueso conocida como colon y ahí es fermentado por la microflora colónica. La fermentación del AR produce ácidos grasos de cadena corta como el ácido acético, propiónico y butírico, estos ácidos grasos son la principal fuente de energía de los colonocitos (células epiteliales del colon) por lo que existen reportes en relación a que el AR previene el cáncer de colon y enfermedades cardiovasculares (Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010; González-Soto *et al.*, 2007; Topping *et al.*, 2001; Sievert y Pomeranz, 1989). Para su estudio y clasificación, el AR se divide en los siguientes tipos: AR1: Es el almidón físicamente inaccesible, el cual está atrapado en su totalidad o en parte en matrices biopoliméricas de proteínas, celulosa o hemicelulosa y se encuentra en granos o semillas molidos; AR2: Son los gránulos de almidón nativos parcialmente cristalinos (no gelatinizados), resistentes a la digestión enzimática; AR3: Es el almidón retrogradado, formado por tratamientos físicos hidrotérmicos donde primeramente existe una gelatinización y una posterior retrogradación; AR4: Se considera que son almidones modificados químicamente para obtener resistencia a la digestión enzimática (Ashwar *et al.*, 2016; Dundar *et al.*, 2013; Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010; Sajilata *et al.*, 2006; Nugent, 2005).

Diversos grupos de investigación han reportado que es factible obtener AR a partir del almidón nativo obtenido de fuentes convencionales como el maíz (Dundar *et al.*, 2013; Chung *et al.*, 2009), la papa (Elmståhl, 2002; Sievert y Pomeranz, 1989), y el trigo (Sievert y Pomeranz, 1989); sin embargo, otros grupos también reportan la posibilidad de obtener AR a partir de almidones de frutos como el plátano (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015; Rivas-González *et al.*, 2008; González-Soto *et al.*, 2007), sin que al momento se hayan realizado estudios para la obtención de AR a partir de frutos como la manzana, a diferencia de la malanga, para la cual sí existen artículos sobre la

modificación de su almidón nativo para la obtención de AR; sin embargo, el almidón nativo de malanga de la variedad estudiada en esta investigación, no se ha modificado por el método físico de autoclaveado ni el químico por hidrólisis ácida (lintnerización). Por lo tanto, estos cultivos, pueden considerarse potenciales fuentes alternativas para el aislamiento de almidones nativos no comerciales con factibilidad para ser modificados y obtener AR.

Con relación al fruto de manzana, la región de Cuauhtémoc, Chihuahua (México) se caracteriza por ocupar el primer lugar en la producción de manzana (SIAP, 2017), destacando la variedad 'Golden Delicious' por sus buenos atributos de calidad (color, sabor, aroma, entre otros). Se han realizado estudios sobre este fruto en los cuales se expone que el contenido de almidón alcanza valores de 44-53% (Singh *et al.*, 2005) y 16% (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016) en base seca, y un 15% en manzanas frescas (Singh *et al.*, 2005), por lo que se considera un fruto adecuado para la obtención de AR.

Por otra parte, el cormo de la malanga (*Xanthosoma sagittifolium*) es de origen americano, se encuentra desde México hasta Brasil, y fue cultivada por los aborígenes de Las Antillas y del resto del continente antes de su descubrimiento (Santos *et al.*, 2011). La producción mundial se estima en 4,000,000 ton concentradas en la zona central y occidental de África Tropical, Las Antillas, Venezuela y Oceanía (Espinosa *et al.*, 2017). *X. sagittifolium* es cultivada principalmente en África (Iwuoha y Kalu 1995). Sin embargo, el almidón de este tubérculo no se ha comercializado ya que sus propiedades son desconocidas. Por lo tanto, se requieren mayores estudios para conocer sobre las propiedades de interés tecnológico de estos almidones provenientes de cormos tropicales (Pérez *et al.*, 2005).

Dentro de los métodos para la producción de AR, destacan los físicos, los cuales involucran la aplicación de calor-humedad, presión, e irradiación por rayos gamma o beta, y los químicos, los cuales involucran el uso de agentes químicos. De ambos métodos destacan la aplicación del método físico de autoclaveado y el método químico de lintnerización (hidrólisis ácida). Como una etapa previa para identificar y sugerir las potenciales aplicaciones de estos AR en los alimentos, es necesario realizar una caracterización fisicoquímica, funcional y de textura para poder inferir su adecuación a los productos alimenticios. Por tal razón, en el presente estudio se caracterizaron las

propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y de textura de almidones resistentes tipo 3 (obtenido por tratamiento físico de autoclaveado) y tipo 4 (producido por tratamiento químico de lincnerización) obtenidos a partir de almidones de maíz, manzana y malanga.

2. ANTECEDENTES

2.1. Manzana

El manzano (*Malus domestica* Borkh) se derivan principalmente de *Malus pumila* Mill., híbridos interespecíficos de *Malus pumila* y *Malus baccata* (L.) Borkh. y otras especies silvestres (Westwood, 1993), pertenece a la familia Rosaceae, subfamilia Maloideae (Pomoideae) (Phipps *et al.*, 1990). Es caducifolio, aunque en ocasiones puede ser siempre verde (Baugher, 2003), sus árboles presentan una altura entre 1.5-7 m y un ancho en la base de 1-4.5 m (Jackson y Palmer, 1999). La forma varía de una copa redonda hasta una piramidal. Presenta hojas ovaladas, elípticas, lanceoladas, oblongas, lobuladas o aserradas (Baugher, 2003). Las yemas son ovoides con escamas pequeñas que sobresalen; las reproductivas son mixtas. Las yemas mixtas contienen entre cinco y ocho flores y un número similar de hojas, la flor central, es más grande y precoz que las laterales. Una flor contiene cinco sépalos, cinco pétalos, cinco pistilos y veinte estambres aproximadamente (Jackson y Palmer, 1999). Las flores son blancas a rosas o carmín y se organizan en cimas (Westwood, 1993). El hipanto y el gineceo están fusionados para formar un ovario ínfero, el cual se desarrolla en un fruto carnoso (Luby, 2003). El fruto es un pomo, caracterizado por tener un ovario ínfero con un endocarpio lignificado, las semillas nacen en cinco carpelos formados de tejido del mesocarpio y receptáculo (Jackson y Palmer, 1999). El fruto es oblongo, cónico u oblicuo, con diámetro entre 2-13 cm, puede ser de tonalidad verde, amarillo y roja (Baugher, 2003). Maduran de 70-180 días o más, dependiendo del cultivar (Westwood, 1993). La manzana es una fruta climatérica, con un proceso de maduración regulado por la síntesis de etileno (Salas *et al.*, 2011). Debido a sus atributos de calidad, la variedad 'Golden Delicious' es la más cosechada en la región (Salas *et al.*, 2011). En los últimos años, se ha optado por variedades como la 'Golden Delicious Smoothee', por su resistencia a enfermedades y plagas (Iglesias *et al.*, 2009). Dicha variedad es resultado de la mutación natural de la 'Golden Delicious', fue liberada en Pensilvania, Estados Unidos de América. Es la variedad Golden más cultivada en el mundo por su similitud con la variedad original (Iglesias *et al.*, 2001).

2.1.1. Producción de Manzana

En México la producción de manzana se realiza en 23 estados (Cuadro 1) (SIAP, 2018), posicionándolo en el 20° lugar (714,149 toneladas en el año 2017) del ranking de producción mundial de manzana. Pero solamente en cuatro estados se concentra la mayor superficie plantada y cosechada, siendo estos: Chihuahua, Puebla, Durango y Coahuila (Cuadro 2) (SIAP, 2017). El estado de Chihuahua es el principal productor a nivel nacional, en 2017 proporcionó 89.2% de la producción de manzana, destacando el municipio de Cuauhtémoc con un promedio mayor al 46% del total de producción del estado y más del 36% a nivel nacional (SIAP, 2017).

Cuadro 1. Principales estados de la República Mexicana productores de manzana.

Estados*	
Aguascalientes	Morelos
Baja California	México
Chiapas	Nuevo León
Chihuahua	Oaxaca
Coahuila	Puebla
Distrito Federal	Querétaro
Durango	San Luis Potosí
Guanajuato	Sonora
Guerrero	Tlaxcala
Hidalgo	Veracruz
Jalisco	Zacatecas
Michoacán	

*Los estados están ordenados alfabéticamente. Fuente: SIAP, 2018.

Cuadro 2. Posicionamiento y producción de manzana de los principales estados de la República Mexicana.

Posición	Entidad federativa	Volumen de producción (ton)
1	Chihuahua	589,227
2	Puebla	36,773
3	Durango	32,652
4	Coahuila	22,653
5	Resto de los demás estados	32,844
Total, nacional =		714,149

Fuente: SIAP, 2017.

Dicha producción a nivel regional tiene gran importancia económica originando valores de hasta \$1,866,659.22 que son casi el 44% del valor total de la producción nacional (SIAP, 2013).

En México las dos principales variedades de manzana comerciales son:

1. La Golden Delicious, es un fruto no muy resistente a la manipulación; de cáscara amarilla intensa en plena maduración. Su pulpa es de color blanca cremosa, compacta, succulenta, dulce, ácida y medianamente aromática. Su cosecha se lleva a cabo entre agosto a octubre.
2. La Red Delicious, su tamaño es variable, de grande a muy grande. Cáscara delgada, lisa y brillante; de color verde estriado de amarillo y rojo. Su pulpa es blanca y verdosa, fina, fundente, azucarada, agridulce, jugosa y perfumada. Su época de cosecha es de septiembre a Noviembre (ASERCA, 1995).

2.1.2. Aspectos Generales de la Manzana y Principales Componentes

Las manzanas son ricas en glúcidos como la fructosa, glucosa, sacarosa y almidón, también se encuentran sustancias diversas como ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, ácidos grasos y aminoácidos (Yamaki, 1984). La manzana contiene fibras dietéticas como la celulosa,

hemicelulosa, pectina, gomas (Lal Kaushal y Sharma, 1995) principalmente, por lo que proporciona beneficios a la salud como la prevención del estreñimiento, mejora en el caso de las diarreas infantiles, acción positiva sobre gran número de enfermedades del colon como el cáncer, mejora la respuesta postprandial por lo que ayuda en los casos de diabetes, y enfermedades cardiovasculares (Meyer y White, 1993; Kaushal y Joshi, 1995). El almidón contenido en las manzanas es acumulado durante el desarrollo del fruto, pero este disminuye gradualmente conforme se efectúa el proceso de maduración debido a que es hidrolizado en azúcares simples (Pérez-Montes, 2008). Las manzanas representan una importante fuente de compuestos fenólicos (0.15-2.5%), los cuales se concentran principalmente en la cáscara, presentan una fuerte actividad antioxidante ya que eliminan radicales libres, la cual favorece a la prevención y tratamiento de algunas enfermedades coronarias y algunos tipos de cáncer (Chinnici *et al.*, 2004). También, posee algunas vitaminas (tiamina, niacina, riboflavina, ácido pantoténico, piridoxina), pero principalmente presenta vitamina C (5-10 mg/100 g de pulpa), la cual posee actividad antioxidante y provoca disminución del estrés oxidativo (Eberhardt *et al.*, 2000).

2.1.3. Almidón Nativo de Manzana

El almidón es el principal carbohidrato de reserva de las plantas y está compuesto por cadenas largas de glucosa (principal fuente de energía en la dieta). Este polisacárido está formado por amilosa (fracción lineal) y amilopectina (fracción ramificada) (Bello-Pérez *et al.*, 2006). Es el principal carbohidrato de almacenamiento presente en frutos inmaduros, como las manzanas, en las cuales su contenido en base seca oscila entre 44-53% y en específico en las 'Golden Delicious' es de 47.5% base seca (Stevenson *et al.*, 2006). Se han apreciado formas redondas, esféricas y domo en almidón de manzanas 'Golden Delicious Smoothie' (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016), cúpula y esférica, y tamaños de 2-12 μm (en almidones de distintos cultivares de manzana) (Stevenson *et al.*, 2006), así como, redondas con un tamaño de gránulo que oscila de 4-12 μm (Singh *et al.*, 2005). El patrón de difracción para el almidón de manzana es de tipo C (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016; Stevenson *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2005).

El almidón es acumulado durante el proceso de crecimiento de la manzana, para después hidrolizarse progresivamente durante la maduración. Al madurar las manzanas, el almidón se hidroliza a azúcares, y sólo pocas células contienen almidón. Por lo tanto, al comienzo de la temporada, este fruto contiene cantidades considerables de almidón. La acumulación y degradación del almidón en las manzanas se exhibe de diferente manera de acuerdo con el cultivar y es dependiente de las condiciones climáticas y su crecimiento. Se ha reportado que una temperatura alta en el verano beneficia la acumulación de este polisacárido (almidón) y puede retrasar la hidrólisis (Singh *et al.*, 2005).

2.1.4. Aspectos Fisicoquímicos del Almidón de Manzana

Se ha encontrado que el contenido de amilosa de almidón de manzana Golden Delicious es de 28%, y el porcentaje de cristalinidad de 47.3% (Stevenson *et al.*, 2006). En almidones de manzana 'Golden Delicious Smoothie' a dos estados de madurez, Tirado-Gallegos *et al.*, 2016 reportan un contenido de humedad de 5.58-6.79% el cual se encuentra dentro del rango permitido para almidones (menores a 20%), un contenido de proteínas, lípidos y cenizas en todos los almidones analizados menores al 0.5%, dicha concentración tan baja de estos componentes se puede atribuir a la pureza del almidón. Otra característica de importancia para la calidad de los almidones es el color, los valores en luminosidad de 98.19 y 98.65 se consideran de elevada blancura, la tonalidad del color (°hue) que oscila entre 94.09 y 161.21°, brinda tonalidades amarillas y verdes a los almidones, debido a los pigmentos presentes en estos frutos inmaduros, es decir, en manzanas cosechadas a 60 y 90 días después de plena floración (DDPF), en relación al croma o saturación del color, con valores que oscilan entre 1.70 y 0.20 (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016). En cuanto al peso molecular, Stevenson *et al.* (2006), encontraron valores de 4.63×10^8 a 1.11×10^9 g/mol para seis cultivares de manzanas.

2.1.5. Aspectos Funcionales del Almidón de Manzana

En relación a las propiedades funcionales de almidones nativos de manzana, los estudios son nulos o escasos, lo cual enfatiza la necesidad de realizar mayor investigación a este respecto. En la literatura científica, solamente se encontró un estudio realizado por Singh *et al.* (2005) donde reportaron que el poder de hinchamiento del almidón de manzana osciló entre 14.4 y 21.3 g/g. Además, los almidones de manzana analizados (de las variedades Criterion, Ruspippum, Red Spur y Granny Smith) presentaron un mayor poder de hinchamiento que los almidones nativos de maíz, a excepción del almidón de la variedad Skyline Supreme (Singh *et al.*, 2005).

2.1.6. Propiedades Térmicas del Almidón de Manzana

Las temperaturas de transición reportadas para almidones nativos de manzana de diferentes tipos de cultivares (Criterion, Ruspippum, Red Spur, Skyline Supreme y Granny Smith) son las temperaturas de inicio, pico y final de gelatinización, las cuales se abrevian como: T_i , T_p y T_f , respectivamente. Estas variaron desde 54.7 a 56.2 °C para la T_i , de 57.1 a 59.1 °C en el caso de la T_p y de 60.2 a 63.5 °C para la T_f ; mientras que la variable térmica del cambio de entalpía de gelatinización (ΔH_{gel}) osciló entre 3.3 y 4.2 J/g. Los valores de las temperaturas de transición térmica (T_i , T_p y T_f) de los almidones de manzana, fueron cercanos a los observados para almidones de papa y ΔH_{gel} fue más baja para los almidones de manzana que para los de maíz y papa normales, lo cual se puede atribuir a una menor cristalinidad de los almidones de manzana en comparación con los otros dos ya mencionados (Singh *et al.*, 2005). Stevenson *et al.* (2006) reportaron para almidones de manzana de las variedades Gala, Golden Delicious, Granny Smith, Jersey mac, Jonagold y Royal Gala, valores de $T_i = 64.1$ a 66.5 °C, $T_p = 70.0$ a 70.9 °C, $T_f = 75.1$ a 77.3 °C y $\Delta H_{gel} = 15.8$ a 17.7 J/g), mientras que en la temperatura de pico de gelatinización (T_p) no encontraron diferencias significativas entre cultivares. Los mismos autores reportan que las temperaturas de gelatinización de los almidones de manzana fueron similares al almidón de maíz comercial (maicena), pero la entalpía fue similar a la fécula de papa. Recientemente, Tirado-

Gallegos *et al.* (2016) reportaron en almidones de manzana ‘Golden Delicious Smoothie’ (a dos estados de madurez), temperaturas iniciales (T_i) de 60.2 y 64.2 °C, con una temperatura de pico (T_p) entre 67.7 y 69.7 °C, una temperatura final (T_f) de 78.5-81.7 °C y una entalpía de gelatinización (ΔH_{gel}) de 9.7-10.2 J/g. Estos investigadores observaron que dichas temperaturas de transición fueron afectadas por el estado de madurez del fruto y el método de aislamiento. De manera general, las propiedades térmicas de los almidones son afectadas por la estructura molecular de la región cristalina y amorfa.

2.1.7. Aspectos Moleculares del Almidón de Manzana (FTIR)

La espectroscopía FTIR permite detectar cambios estructurales del almidón a un nivel molecular de corto alcance, principalmente en las señales 1,047 (vibraciones en la región cristalina), 1,022 (vibraciones en la región amorfa) y 995 cm^{-1} (Sevenou *et al.*, 2002; Van Soest *et al.*, 1995). La señal a 995 cm^{-1} , se ha relacionado con el enlace por puente de hidrógeno intramolecular del grupo hidroxilo del carbono 6, el cual es sensible al agua (Simts *et al.*, 1998). La relación obtenida del cociente de intensidad de las absorbancias 1047/1022 ó 1022/995 cm^{-1} proporcionan información sobre el grado de cristalinidad de los almidones (Sevenou *et al.*, 2002). Al respecto, Tirado-Gallegos *et al.* (2016) reportaron que, en todas las muestras de sus almidones aislados de manzanas, se obtuvo el valor de 0.69 en la relación 1047/1022 cm^{-1} , concluyendo que no hubo cambios en la cristalinidad (a corto alcance molecular) de los almidones de manzana estudiados, lo cual evidenció que no se presentaron cambios en el orden estructural de los almidones.

2.1.8. Aspectos Reológicos del Almidón de Manzana

Tirado-Gallegos *et al.* (2016) reportaron que las dispersiones de almidón de manzanas inmaduras presentan un comportamiento de flujo no-Newtoniano del tipo de corte adelgazante (pseudoplástico), caracterizado por valores de “ n ” menores a 1. Además, observaron una

diminución en la viscosidad aparente conforme aumentó la velocidad de corte y el índice de consistencia (k) mostró un incremento en la viscosidad aparente de 5.49 a 14.67 Pa·sⁿ (a dos estados de madurez 60 y 90 DDPF). En estudios realizados con almidón de manzana no se reportan curvas flujo si no pruebas viscoelásticas. Singh *et al.* (2005) observaron que los almidones de Red Spur y Criterion con un tamaño de gránulo más grande mostraron valores más altos de G' y G'' , mientras que los de menor tamaño de gránulos o degradados mostraron una G' y G'' más baja. Cabe mencionar, que el comportamiento reológico, está influenciado por el tamaño y forma del gránulo, la relación amilosa/amilopectina dados por la fuente botánica (Berski *et al.*, 2011).

2.1.9. Modificaciones Físicas y Químicas en Almidón de Manzana

En lo reportado en la literatura científica, no se han realizado estudios sobre modificaciones de almidones de manzana por métodos físicos o químicos, por lo cual, este estudio es de suma importancia, ya que se realizaron dos modificaciones en almidón de manzana: Una física (autoclaveado) y otra química (lintnerización o hidrólisis ácida).

2.2. Malanga (*Xanthosoma sagittifolium*)

Es un cormo comestible que pertenece a la familia de las aráceas, es herbácea perenne, con un ciclo de vida mayor a uno o dos años y una altura de 1 a 3 m sin tallo aéreo. El tallo central es elipsoidal, conocido como cormo. La inflorescencia brota entre las hojas en espádice, provistas de una espata blanca de 12 a 15 cm, con flores femeninas en su porción inferior, masculinas en la superior y estériles en la media (SIAP, 2017).

Se considera un cultivo de clima tropical, con temperaturas que fluctúan entre 20 a 30 °C y con buena luminosidad. No resiste bajas temperaturas y no tolera agua permanente, puede soportar un periodo de sequía corto. Se puede cultivar a una altitud baja y mediana, no mayor a los 1000 metros

sobre el nivel del mar (msnm). Estos cultivos deben tener una humedad relativa ambiental de 70 al 80%, se adaptan a suelos profundos, fértiles y drenados, a un pH óptimo de 5.5 a 6.5. Para su óptimo desarrollo, requiere entre 1,500 y 2,500 mm de lluvia al año. El ciclo de crecimiento es de 9-11 meses; en los seis primeros meses se desarrollan los cormos y las hojas. En los cuatro posteriores, el follaje permanece estable y al comenzar a secarse, las plantas están listas para la cosecha de los cormos. En las siembras comerciales la cosecha se realiza a los diez meses para la malanga blanca y doce meses para la malanga morada (SIAP, 2017; Anónimo, 2014).

2.2.1. Producción y Consumo de Malanga

Se cultiva en varios países tropicales y subtropicales, se ha identificado como cultivos de raíces subexplotados, con un futuro incierto a través de la demanda limitada. Los cormos de malanga se les da menos importancia que a otras raíces tropicales como la yuca o el camote, sin embargo, en varios países son una forma de subsistencia y de emergencia, siendo un cultivo estable, considerado como un alimento saludable y no como alimento básico en partes de Ghana, Japón, Nigeria y Hawái (Owusu-Darko *et al.*, 2014; Pérez *et al.*, 2005). En el Caribe y África Occidental, los cormos de tannia (*X. sagittifolium*) domina en comparación con el taro (*C. esculenta*). Tannia es un cultivo de origen sudamericano, domesticado por los indios americanos tropicales y la gente del Caribe. Se estima que existen cerca de 40 especies de *Xanthosoma* nativas. Se le conoce en castellano como: yautía o malanga (Antillas), macal, (México), quiscamote (Honduras), okumo (Venezuela), malangay (Colombia), otó (Panamá); en inglés: cocoyam; otros idiomas: queiquexque (México) y tannia en las Antillas (Montaldo, 1991).

Durante el comercio de esclavos fue trasladado a África y desde el siglo XIX se ha cultivado en las islas del Pacífico y Asia debido a su resistencia a las plagas y enfermedades (Owusu-Darko *et al.*, 2014). Es un alimento básico para millones de personas en África Central, particularmente en Chad y Camerún (Panyoo *et al.*, 2014), y debido a las migraciones, América y Europa ahora están adquiriendo nuevos consumidores por sus altos valores nutritivos. En América, la producción de malanga no figura como un cultivo principal; sin embargo, se produce en Nicaragua, Ecuador,

Puerto Rico, República Dominicana y Costa Rica, países en los que inclusive se ha disminuido su cultivo, debido a problemas fitosanitarios, lo que ha ocasionado el abandono del mercado más demandante, él cual es, EUA. En México su producción apenas comienza: los estados de Oaxaca, Veracruz y Puebla, en conjunto, suman aproximadamente 100 Ha, de las cuales se cosechan unas 2,500 ton, que se destinan a la exportación a EUA y Canadá, cuya demanda supera las 30,000 ton al año (Martínez-Alvarado *et al.*, 2010).

El uso de este cormo puede ser similar al de la papa en el mundo occidental, se puede consumir de diferentes modos, ya sea hervidos, asados, horneados, molidos, freídos (chips), machacados, en harinas para hornear, como espesante para sopas y bebidas, en papillas, como alimentos de destete, en la producción de alimentos para personas con trastornos intestinales, en alimentos procesados para bebés (gracias a su alta digestibilidad y tamaño pequeño de su gránulo) y finalmente las hojas jóvenes son una excelente verdura, así como también se usa en platillos étnicos como el Poi, Achu y Sapal (Graf *et al.*, 2018; Owusu-Darko *et al.*, 2014).

2.2.2. Principales Componentes Nutritivos de la Malanga

En estudios realizados se ha encontrado que la malanga contiene más proteína que otros tubérculos, su contenido de almidón es relativamente alto y digerible (Moorthy, 2002). También se ha demostrado que contiene almidón digerible, vitamina C, tiamina, riboflavina y niacina, y altos contenidos de proteínas y aminoácidos esenciales (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004). Contiene aproximadamente 75.5% de carbohidratos, 10.95% de humedad, 6.93% de proteína cruda y 2.1% de ceniza en materia seca (Amanze, 2009). Aporta 390 calorías por 100 g de materia seca (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004). Contiene más proteína que otros cultivos de raíces como la mandioca y la batata (Owusu-Darko *et al.*, 2014; Amanze, 2009). En cormos de taro, se han observado y estudiado dos globulinas las G1 y G2 (actividad inhibidora de tripsina y almacenamiento, y actividad inhibidora de proteínas de almacenamiento, defensiva; respectivamente), estas representan el 80% aproximadamente del total de proteínas solubles en cormos (Owusu-Darko *et al.*, 2014). Su contenido de fibra dietética, es menor al 1% (Bradbury y Holloway, 1988).

A pesar de las propiedades que presenta este cormo, en comparación con otras raíces y tubérculos, su uso es limitado, debido a la poca información sobre él. Sin embargo, una de las mejores maneras de preservar este cormo y aumentar su rentabilidad e ingresos podría ser su procesamiento para obtener harinas y almidones debido a la alta concentración de este polisacárido (Falade y Okafor, 2013; Pérez *et al.*, 2005).

2.2.3. Almidón Nativo de Malanga

En los cormos, el almidón representa el 16-24% del peso, el resto corresponde a agua, y restos de proteínas y lípidos. El almidón contenido en los cormos presenta mayor peso molecular y se conforman de gránulos de mayor diámetro, comparados con los de los almidones de cereales (Khlestkin *et al.*, 2018). El almidón nativo de malanga posee un tamaño granular que oscila entre 15 y 40 μm (Lawal, 2004), con formas redondas y poligonales. Posee un patrón de difracción de rayos X tipo 'A', en este tipo de almidones, por lo general presentan longitudes más cortas de cadenas ramificadas de amilopectina, lo que reduce la estabilidad estructural de las hélices de esta, por lo cual, lo hace más propensa a la digestión enzimática (Srichuwong *et al.*, 2005). Los gránulos de almidón de malanga son pequeños y fáciles de digerir por lo que se recomienda su consumo para niños y personas con un sistema digestivo débil (Amanze, 2009). Graf *et al.* (2018) corroboraron que el consumo de malanga trae beneficios para el desarrollo infantil y el tratamiento de la gastritis adulta, esto puede deberse tanto a la digestión facilitada de los almidones de malanga en el tracto gastrointestinal superior como a los cambios positivos en la diversidad del intestino microbiano.

En almidón nativo de malanga se ha reportado un contenido de 73.8% de AR y en almidón de malanga sometido a un proceso de gelatinización se exhibe un 16.6% de AR (Hoyos-Leyva *et al.*, 2017). Los almidones nativos se han utilizado desde la antigüedad como materia prima para la preparación de diferentes productos; pero en los últimos años, se ha optado por la obtención de almidones de fuentes no convencionales poniendo énfasis en el estudio de sus propiedades reológicas, fisicoquímicas y funcionales. En la actualidad se está aumentando el uso del almidón

en la industria alimentaria debido a sus propiedades funcionales como su baja viscosidad, alta estabilidad, claridad, capacidad de formación de película y propiedades de enlazamiento. Pese a lo anterior, la utilización de almidones nativos tiene algunos inconvenientes debido a que las condiciones del procesamiento en los alimentos (por ejemplo, temperatura, pH, presión o esfuerzos cortantes), propician a que el almidón nativo sufra descomposición a baja temperatura, presente alta retrogradación y sinéresis lo que reduce o limita su uso en aplicaciones industriales. Estas deficiencias pueden ser superadas mediante la modificación de almidón para mejorar sus características, disminuir cualidades indeseadas y proporcionar nuevos atributos (Zamudio-Flores *et al.*, 2006). Diversos grupos de investigación han mencionado que es factible la obtención de un tipo de almidón con cualidades nutricionales y fisiológicas para la salud humana, el cual se denomina almidón resistente (AR) (Ashwar *et al.*, 2016; Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010; Sajilata *et al.*, 2006; Nugent, 2005).

2.2.4. Aspectos Físicoquímicos del Almidón Nativo de Malanga

En relación a los aspectos físicoquímicos del almidón de malanga, Hoyos-Leyva *et al.* (2017) reportaron el contenido de proteínas, humedad, y amilosa en almidones de malanga de distintas variedades; sin embargo, en la variedad *X. sagittifolium*, cuantificaron un 4% en proteínas, humedad de 5.5% y 11.3% de contenido de amilosa, donde atribuyen que el contenido de proteínas induce la formación de agregados esféricos durante el método de secado por pulverización, y en cuanto al contenido de amilosa lo relaciona con la biosíntesis del almidón. Por su parte Deka y Sit (2016) evaluaron almidones de malanga (*Colocasia esculenta* var. *antiquorum*), donde el contenido de grasa, proteínas y ceniza fueron menores al 1% y el contenido de amilosa fue de 13.90%.

En almidones de ocumo chino (*C. esculenta* (L.) Schott) y ocumo criollo (*X. sagittifolium* (L.) Schott), los valores de proteínas, cenizas y grasas fueron también menores al 1%, ambos estudios indican que los almidones fueron extraídos con alta pureza. En cuanto a la amilosa, el almidón de ocumo criollo estuvo más alto (26.17%) que el del ocumo chino (12.69%), estas diferencias pueden

deberse a que este parámetro es característico e inherente de cada especie (Palomino *et al.*, 2010). El contenido de amilosa fluctúa entre 15-25%, similar a otros almidones de tubérculos (Moorthy, 2004).

En un estudio elaborado por Graf *et al.* (2018) entre la malanga de la variedad (*X. sagittifolium*) y papa (*S. tuberosum*), se reflejaron los siguientes resultados: el mayor contenido de carbohidratos en la malanga (85.01% p/p), se debió a un mayor contenido de almidón total (70.70% p/p), así como a una fibra total ligeramente más alta (11.9%) y azúcares libres (5.44%), especialmente sacarosa (4.19%). El perfil de fibra para malanga y papa difiere en que la malanga contiene fibra soluble más baja (4.10% vs 4.60% en la papa) y almidón resistente (4.21%), pero niveles más altos de fibra insoluble (7.80%) y oligosacáridos resistentes (0.50%). Tanto el polvo de malanga como el de papa presentaron bajos niveles de grasa (0.20% vs 0.00%) y niveles similares de ceniza (3.60 vs 3.38%). El almidón procedente de la malanga se caracterizó por presentar una relación menor de amilosa/amilopectina que el almidón de papa.

En cuanto al color, el almidón nativo de almidones de malanga de la variedad *C. esculenta* presentó la mayor luminosidad (92.95), mientras que en la coordenada a* y b* (2.02 y 1.56) presentaron valores bajos y positivos (Deka y Sit, 2016). En otra investigación, se evaluó el color en almidones de seis variedades de malanga, donde observaron valores de luminosidad de 83-94, en a* de 1.5-5.7 y b* de 3.0-13.8 (Aboubakar *et al.*, 2008).

2.2.5. Aspectos Funcionales del Almidón Nativo de Malanga

La solubilidad de los almidones es dependiente de factores como la fuente botánica, poder de hinchamiento, y la presencia de otros componentes (Moorthy, 2002). El poder de hinchamiento evaluado en muestras de almidón de malanga aumenta a medida que la temperatura se incrementa, el almidón nativo de malanga presenta un poder de hinchamiento inferior al reportado para almidón de papa y superior al de almidón de maíz. Lawal (2004) encontró que la solubilidad aumenta, en el

almidón nativo, a medida que la temperatura se incrementa, él reporta una solubilidad en un rango de 26.54 a 160.6% en un rango de temperatura de 55-95 °C.

La solubilidad aumentó con la temperatura en el almidón nativo de malanga. El poder de hinchamiento de los almidones indica diferencias en la organización molecular de los gránulos dado que cada tipo de almidón se hincha de manera diferente. Deka y Sit (2016) reportaron un poder de hinchamiento de 10.57 g/g a 95 °C y una solubilidad de 8.27% a 95 °C en almidón de malanga. Otro aspecto importante es el contenido de fósforo, este es un parámetro utilizado para definir las propiedades funcionales de los almidones. Siendo más alto el contenido de fósforo en la variedad *X. sagittifolium* que en la variedad *C. esculenta* (0.07 vs 0.01% p/p), respectivamente (Pérez *et al.*, 2005).

2.2.6. Propiedades Térmicas del Almidón de Malanga

Las transiciones térmicas están relacionadas con los cambios en la estructura del gránulo de almidón. En estas transiciones endotérmicas ocurre una gelatinización del almidón, donde se modifica el orden interno de los gránulos, y la estructura semi-cristalina característica del almidón sufre una transición de orden-desorden. Después de la gelatinización, las zonas amilosa-amilopectina se vuelven completamente amorfas (Rincón-Aguirre *et al.*, 2017). Las temperaturas de transición reportadas por Srichuwong *et al.* (2005) para almidones de nuevo cocoyam *X. sagittifolium* fueron las siguientes: $T_i = 74.3$ °C, $T_p = 77.2$ °C, $T_f = 87.3$ °C y una entalpía de gelatinización de 13.7 J/g. Dichas temperaturas son mayores a los reportados para almidones de papa, arroz, maíz y yuca. Estos resultados confirman la variación de la cristalinidad en los diferentes tipos de almidones.

Lawal (2004) reportó para almidón nativo de malanga *X. sagittifolium* una temperatura de inicio de gelatinización (T_i) de 77.15 °C, una T_f de 79.80 °C y una entalpía de 7.07 J/g, donde refieren que estas temperaturas de transición son comparables a los almidones de otros tubérculos como la yuca y la papa. En otro estudio del almidón nativo de malanga, se registró una temperatura máxima de gelatinización (T_p) de 77.31 °C y una entalpía de gelatinización de 10.85 J/g (Rincón-Aguirre

et al., 2017). La entalpía está relacionada con la energía requerida para el proceso de gelatinización (Lawal, 2004) y con el contenido de amilosa, habiendo un mayor contenido de amilosa, existe un menor arreglo cristalino, por lo tanto, se necesitan valores bajos de entalpía para que los gránulos de almidón gelatinicen (Stevenson *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2005).

2.2.7. Aspectos Moleculares del Almidón de Malanga (FTIR)

El FTIR es una herramienta que estudia el estado energético (vibracional) de un sistema que está directamente relacionado con la composición química y sus cambios, además, brinda información sobre las interacciones de Van der Waals en la que no se producen enlaces químicos como resultado de cualquier modificación. El espectro del almidón tiene cuatro regiones importantes, para una mayor caracterización de las bandas clave, las cuales son: por debajo de 800 cm^{-1} , $800\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ (región de la huella digital), 2800 y 3000 cm^{-1} (región de estiramiento C-H) y, por último, la región entre 3000 y 3600 cm^{-1} (región del estiramiento O-H) (Rincón-Aguirre *et al.*, 2017). Los espectros mostraron una absorción en los números de onda 574 , $1020\text{-}1026$, 1056 , 1151 , 1365 , 1631 , 2922 y 3400 cm^{-1} confirman la naturaleza de carbohidratos en las muestras. Aboubakar *et al.* (2008) reportaron una banda amplia (1047 cm^{-1}) por lo cual utilizaron la banda 1056 cm^{-1} al deconvolucionar los espectros, mientras que los índices de cristalinidad de las seis variedades de almidón de malanga analizadas estuvieron en el rango de 1.3-3.5.

En los espectros de almidón nativo de malanga *C. esculenta* se han reportado señales en los números de onda de 1159 , 1082 , 1014 cm^{-1} (atribuidos a los estiramientos de los enlaces C-O), 992 , 929 , 861 , 765 y 575 cm^{-1} (vibraciones del estiramiento del anillo anhidro glucosa). La señal reportada a 2923 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilo y por último una banda de 3421 cm^{-1} corresponde a los estiramientos de los enlaces H-O de los hidroxilos presentes en la molécula del almidón (Torres *et al.*, 2015).

2.2.8. Estudios Reológicos del Almidón Nativo de Malanga

Los estudios reológicos del almidón de malanga, son escasos, y la mayoría se han enfocado en sus propiedades reológicas de corte en estado estable o curvas de flujo, por ejemplo y solamente por citar algunos, Nwokocha *et al.* (2009) compararon almidones de yuca (*M. esculenta*, Crantz) y malanga *C. esculenta* a través de sus curvas de flujo, como resultado observaron un comportamiento no Newtoniano del tipo pseudoplástico, ya que el índice de flujo fue menor a 1. Aunque es escasa la información en cuanto a esta caracterización, se han realizado estudios también en relación al almidón de corno de malanga, por ejemplo, Graf *et al.* (2018) evaluaron las propiedades reológicas [(viscosidad aparente, el esfuerzo de cedencia (τ_0) y el coeficiente de consistencia (k)] de polvos de malanga en comparación con polvos de papa (los tubérculos, malanga y papa fueron pelados, hervidos, machacados, congelados y liofilizados). Estas variables fueron menores a malanga; mientras que el índice de comportamiento de flujo (n) para malanga estuvo más cerca del comportamiento newtoniano (≈ 1) que el de papa. La menor viscosidad aparente de los almidones se ha relacionado con un mayor contenido de amilopectina; mientras que una mayor digestibilidad se asocia con la disponibilidad para la hidrólisis enzimática y con tamaños moleculares más pequeños.

Se han reportado otros estudios reológicos de estos tipos de almidones utilizando el perfil de formación de pastas por medio de un visco-amilógrafo Brabender. Por ejemplo, Sefa-Dedeh *et al.* (2002) observaron que la harina de corno de la variedad *X. sagittifolium* (pulpa o carne blanca) presentó mayor estabilidad térmica y viscosidad de retroceso (setback) que la variedad *X. sagittifolium* (pulpa o carne morado). La *C. esculenta* mostró una menor viscosidad de empastado (de formación de pasta) pero una mayor estabilidad térmica que las especies de *Xanthosoma*. La temperatura de empastado para las variedades osciló de 78.3 a 79.8 °C, con temperaturas de empastado más altas en la variedad *X. sagittifolium* y menor en *C. esculenta*. Este índice se caracteriza por el cambio inicial en la viscosidad debido a las propiedades de hinchamiento de los almidones con lo que se concluye que *C. esculenta* es más fácil de cocinar y requerirá menor energía (en forma de calor) para el inicio de la gelatinización. Por otra parte, se analizaron almidones de dos variedades de tubérculos de ocumo criollo (*Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott)

y ocumo chino (*Colocasia esculenta* (L.) Schott), las cuales presentaron resistencia a la desintegración mecánica, mayor consistencia, alta tendencia a la retrogradación y comportamiento no-Newtoniano del tipo pseudoplástico (Palomino *et al.*, 2010).

2.2.9. Modificaciones Físicas y Químicas en Almidón de Malanga

Hasta el momento, el almidón de malanga de la variedad *X. sagittifolium* ha sido poco estudiado, por lo que se cuenta con poca información sobre ello; sin embargo, la variedad *C. esculenta* ha sido más explorada. Lawal (2004) al modificar un almidón de malanga *X. sagittifolium* por tres métodos químicos: oxidación (oNCS), acetilación (aNCS) e hidrólisis ácida (atNCS). La acetilación mejoró la capacidad de hinchamiento mientras que la oxidación y la hidrólisis ácida la redujeron. Tanto la oxidación como la hidrólisis ácida mejoraron notablemente la solubilidad mientras que la acetilación la redujo. En el análisis químico proximal, observó que el contenido de ceniza, grasa, fibra cruda, proteína y contenido de amilosa se redujeron después de las modificaciones. Las modificaciones realizadas al almidón nativo de malanga no alteraron la morfología de los gránulos, los cuales presentaron un patrón de difracción de rayos X tipo A, similar al de los modificados. La temperatura de gelatinización del almidón nativo de cocoyam o malanga (76 °C) se redujo después de la oxidación y la acetilación, pero aumentó después de la hidrólisis ácida. La calorimetría de barrido diferencial (DSC, por sus siglas en inglés de Differential Scanning Calorimetry) mostró que la oxidación y la acetilación redujeron la temperatura máxima de gelatinización (T_p) del almidón nativo, frente al aumento de T_p después de la hidrólisis ácida y la tendencia a la retrogradación se redujo después de la oxidación y la acetilación, pero aumentó después de la hidrólisis ácida.

Lawal (2005) realizó modificaciones hidrotérmicas (recocido o annealing y tratamientos de calor-humedad a 18, 21, 24 y 27%) a almidones de malanga *X. sagittifolium*; de acuerdo con el análisis de microscopía electrónica de barrido, se observaron formas redondas y poligonales con tamaños que fluctuaron de 15 a 40 μm , tanto para los almidones nativos como los modificados, presentando patrones de difracción de rayos X del tipo "A" sin que se observaran diferencias significativas en

este patrón entre los almidones modificados y los nativos. En las propiedades funcionales estudiadas (poder de hinchamiento, solubilidad, capacidad de absorción de agua y aceite), estas presentaron una reducción en todos los almidones modificados, en comparación con el almidón nativo, el cual mostró mayor hinchamiento y solubilidad. La capacidad de absorción de agua se vio mejorada con las modificaciones y la capacidad de absorción de aceite se redujo. Los estudios por DSC mostraron un aumento en la temperatura de gelatinización después de las modificaciones, dichas modificaciones físicas redujeron la retrogradación a medida que las entalpias de re-gelatinización se reducían.

Deka y Sit (2016), evaluaron el efecto del tratamiento calor-humedad al 25% en malanga *C. esculenta var. antiquorum*, el cual modificó mediante tratamientos individuales de microondas, autoclave y horno de aire caliente, así como tratamientos duales de microondas seguidos de autoclave y microondas seguido de un horno con aire caliente, donde observaron una pérdida de la integridad física de los gránulos en el autoclaveado y microondas de forma individual y dual. Esto lo atribuyeron a la gelatinización parcial del almidón durante los tratamientos, como lo es la hinchazón, ruptura o fusión de los gránulos. En cuanto a la viscosidad, el almidón autoclaveado presentó menor viscosidad con que el almidón nativo. Los almidones modificados fueron más estables al congelamiento-deshielo que el almidón nativo.

Torres *et al.* (2015), en un almidón acetilado de malanga *C. esculenta* reportaron una disminución en el contenido de humedad (2.4%) en comparación con su contraparte nativa (7.21%), con respecto al contenido de lípidos y proteínas, el almidón nativo presentó un mayor contenido de estos componentes (0.79% y 7.29%, respectivamente) que en el almidón acetilado debido al proceso de modificación. Por efecto de temperatura observaron que, tanto en el almidón de malanga nativo como en el acetilado, la capacidad de retención de agua aumentó, debido a la gelatinización del almidón, ya que cuando los gránulos son calentados en solución acuosa, estos se hinchan y atrapan una mayor cantidad de agua (Torres *et al.*, 2015).

2.3. Almidón Resistente (AR)

Este almidón no es digerido en el intestino delgado, llega al intestino grueso donde es fermentado por la microflora del colon produciendo diversos compuestos benéficos para el organismo. El AR se define como la suma del almidón y los productos de su degradación que no son absorbidos en el intestino delgado de individuos sanos (EURESTA, 1992). Este almidón se caracteriza por tener efectos fisiológicos similares o mejores que los de la fibra, al ser ingerido, ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares, reducir niveles de colesterol y triglicéridos en la sangre. El almidón resistente es un ingrediente nutracéutico utilizado en la industria de alimentos (Brummer y Cui, 2005). El AR se clasifica en cuatro tipos: AR1: Es el almidón físicamente inaccesible, que se encuentra en granos integrales; AR2 son los gránulos de almidón nativos protegidos de la digestión por la estructura del gránulo, como en las papas crudas y el plátano verde; AR3 es el almidón retrogradado y AR4: son almidones obtenidos por modificaciones químicas (Ashwar *et al.*, 2016; Dundar *et al.*, 2013; Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010; Nugent, 2005).

2.3.1. Producción de AR

Los métodos de obtención de AR pueden ser físicos o químicos. El almidón resistente tipo III (AR3) es producido mediante un tratamiento hidrotérmico (un método físico), donde se provoca una interrupción de la estructura granular mediante un proceso de gelatinización. Por consiguiente, el almidón es calentado con exceso de agua y es sometido a ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento. Esto puede ser mediante el autoclaveado, donde el almidón calentado sufre la gelatinización o pérdida de la estructura cristalina y al ser enfriado se produce una recristalización lenta en sus componentes (amilosa y amilopectina) estableciendo estructuras ordenadas gracias a la alineación por puentes de hidrógeno entre las cadenas adyacentes, este fenómeno fisicoquímico se conoce como retrogradación. Tras la deshidratación y el enfriamiento existe un aumento en la interacción entre los componentes de almidón (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2008). Para la producción de un mayor contenido de AR3 se debe realizar una aplicación sucesiva de los ciclos ya que se

provoca la eliminación de las partes amorfas obteniendo mayores estructuras cristalinas (Mutungi *et al.*, 2009).

Dentro de los métodos químicos se encuentra la lintnerización, considerado como uno de los principales métodos químicos utilizados para modificar la estructura del almidón para obtener estructuras cristalinas que resistan la hidrólisis o el ataque enzimático (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015). Esta modificación consiste en suspender el almidón en una solución acuosa de ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H₂SO₄) y mantenerlo a una temperatura ambiente y por debajo de su temperatura de gelatinización. Posteriormente, el ácido se neutraliza y el almidón se recupera por filtración. Esta hidrólisis procede de manera aleatoria, rompiendo los enlaces α -1,4 y α -1,6 y disminuyendo la longitud de la cadena de amilosa con el paso del tiempo de la reacción. El enlace α -1,4 y las regiones amorfas que contienen el enlace α -1,6 son más accesibles a la penetración de ácidos y la hidrólisis. La modificación ácida incluye un ataque de dos etapas en los gránulos de almidón. En la primera etapa, se produce un ataque inicial rápido en las regiones amorfas del almidón que contiene de ramificación con enlace α -1,6; y se ha observado un aumento en la fracción lineal del almidón en esta etapa. Durante la segunda etapa se lleva a cabo una hidrólisis más lenta en las regiones cristalinas (Xie *et al.*, 2005).

También la lintnerización disminuye la masa molar del almidón, permitiendo la obtención de moléculas lineales o muy poco ramificadas (Rivas-González *et al.*, 2008). Dicha modificación puede cambiar las características morfológicas, estructurales y funcionales de los gránulos de almidón, para esto, es necesario conocer la fuente vegetal de donde provienen y así entender cómo el tratamiento con ácido modificará y alterará la funcionalidad del gránulo (Mendoza *et al.*, 2017).

2.3.2. Efectos Fisiológicos del AR

El AR funciona de manera análoga a como lo hace la fibra dietaria, por lo que se le ha relacionado con efectos fisiológicos importantes en el organismo. Es una de las fuentes dietéticas más abundantes de carbohidratos no digeribles y podría ser tan importante como los polisacáridos no

amiláceos (NSP) para promover la salud intestinal (Topping *et al.*, 2003), actuando a través de sus productos de fermentación bacteriana (ácidos grasos de cadena corta, como acético, propiónico y butírico) en el intestino (Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010). Estos ácidos grasos de cadena corta difieren de la fermentación de NSP o fibra dietaria, ya que promueven la formación de acetato, propionato y en mayor proporción la formación de butirato (Annison *et al.*, 2003).

El ácido butírico es el principal sustrato de energía de los colonocitos y es un agente protector importante en la prevención y tratamiento del cáncer de colon. Además, en estudios *in vitro* se ha comprobado la capacidad que este ácido graso presenta para revertir los cambios neoplásicos e inducir la apoptosis (muerte celular programada naturalmente que elimina el ADN dañado, células viejas o no deseadas) de los colonocitos, lo que explica que el butirato puede tener efecto regulador en la carcinogénesis colorrectal (Nugent, 2005; Velázquez *et al.*, 1996).

El propionato se transporta al hígado donde interviene en la gluconeogénesis y el acetato entra en la circulación sistémica, y es utilizado por el cerebro, corazón y tejidos periféricos (Scott *et al.*, 2013), por lo cual se les relaciona con el control de las enfermedades cardiovasculares (García-Alonso *et al.*, 1997 citado por Carlos-Amaya, 2010).

El AR también puede comportarse como sustrato para el crecimiento de los microorganismos probióticos (Sajilata *et al.*, 2006; Tooping *et al.*, 2003). Además, su consumo puede conllevar beneficios para la diabetes tipo II (no insulino dependiente) y obesidad, ya que, reduce el Índice glucémico (IG); el metabolismo del AR ocurre en un lapso de 5-7 horas después del consumo, a diferencia del almidón nativo, que se digiere casi de inmediato. La digestión de 5 a 7 h reduce la glucemia posprandial, la insulinemia y también aumenta la saciedad (Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2010; Nugent, 2005). También favorece la absorción de minerales (Ca, Mg, Zn, Fe y Cu) y colabora en la prevención de formación de cálculos biliares (Dundar *et al.*, 2013; Sajilata *et al.*, 2006). Se ha reportado que el AR, también reduce la acumulación de grasa a largo plazo, esto se logra reemplazando el 5.4% de los carbohidratos de la dieta total con AR, lo que aumentaría la oxidación de los lípidos postprandiales (Higgins *et al.*, 2004).

En la actualidad existe la tendencia en la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de obtención de almidones con mejores características fisicoquímicas y funcionales a los que se obtienen de las

fuentes convencionales comerciales (maíz, papa y trigo, principalmente). Al momento no hay estudios sobre la obtención de AR de una fuente no convencional como es la manzana y existe muy poca información sobre la malanga, ya que es una fuente que recientemente se empieza a explorar en nuestro país; sin embargo, antes de una factible aplicación alimenticia a este tipo de productos, es necesario caracterizarlos en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y de textura.

2.3.3. Propiedades Fisicoquímicas del AR

Las propiedades fisicoquímicas de los almidones influyen directamente en las aplicaciones de estos en la industria alimentaria y no alimentaria, y dichas propiedades dependen principalmente de la fuente botánica (Cai *et al.*, 2013). En el análisis químico proximal de almidones de plátano autoclaveado, ha demostrado que su contenido de humedad es mayor que en su homólogo nativo, debido a que las cadenas lineales producidas durante el autoclaveado pueden incrementar la capacidad de unión al agua. En cuanto al contenido de humedad y proteínas estas han resultado menores al 1%, los cuales se reducen conforme a su contra parte nativa, esta tendencia es similar en las grasas. El contenido de amilosa aumenta significativamente en el almidón autoclaveado, lo cual se atribuye a una des-ramificación parcial de la amilopectina debido al calentamiento y presión de la autoclave. También se ha reportado que el contenido de almidón resistente es más alto en el almidón autoclaveado, que en el nativo, esto es debido a los ciclos de autoclaveado y enfriamiento, los que dan como resultado una combinación de un proceso de gelatinización (que interrumpe la estructura granular), una dispersión de almidón en exceso de agua caliente y retrogradación, y una recristalización de los componentes del almidón (amilosa y amilopectina) al enfriar, resultan en la producción de almidón resistente retrogradado (Babu *et al.*, 2014).

Las modificaciones físicas por distintos métodos (autoclave, microondas, aire caliente y dual por microondas-autoclave), cambian el color en los almidones de malanga. Después del autoclaveado los almidones presentan valores más bajos de luminosidad, y altos en a^* y b^* , estos cambios se atribuyen a la combinación de temperatura y presión extremas y a una mayor duración del

tratamiento durante el autoclaveado (Deka y Sit, 2016). En el estudio de Ashwar *et al.* (2016) de almidones de arroz autoclaveados-retrogradados la luminosidad de todas las variedades analizadas se redujo significativamente. El valor de b^* o amarillez aumentó significativamente y el valor de a^* o enrojecimiento mostró pequeñas diferencias. El cambio observado pudo ser causado por la reacción de Millard durante el tratamiento de autoclave por la alta temperatura utilizada.

El contenido de amilosa reportado para almidones lintnerizados de maíz, papa y arroz es menor en comparación con su contra parte nativa. La disminución en el contenido de amilosa se atribuye a la hidrólisis parcial por el ácido. Aunado a esto, el cambio de los diferentes almidones en el contenido de amilosa puede atribuirse a un mayor grado de despolimerización de la amilosa o a la degradación de la amilopectina (Wang y Wang, 2001). Se ha reportado que la hidrólisis ácida disminuye el contenido de AR en almidones de plátano en comparación con su homólogo nativo (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015).

2.3.4. Propiedades Funcionales del AR

Las propiedades funcionales como el poder de hinchamiento, índice de solubilidad e índice de absorción de agua pueden ser modificadas al obtener AR. Al respecto, Aparicio-Saguilán *et al.* (2015) refieren que el hinchamiento en almidón de plátano lintnerizado durante 7 días, mostró un ligero incremento en el valor de hinchamiento a 70 °C y concluyeron que al aumentar la temperatura se promovió la desorganización de los gránulos de almidón, lo cual repercutió en un aumento en los valores de hinchamiento. Investigaciones actuales han reportado que la combinación de tratamiento ácido y calor-humedad para la formación de almidón resistente de arroz resultan en una reducción en el poder de hinchamiento y un aumento en la solubilidad (Huang *et al.*, 2016). Este aumento en la solubilidad también se ha visto en almidones lintnerizados, por Lawal (2004) en malanga, arroz (Van Hung *et al.*, 2016) y plátano (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015), y ha sido atribuido al debilitamiento de la estructura interna de los gránulos de almidón y despolimerización de la amilosa (El Halal *et al.*, 2015). Por otro lado, Dundar y Gocman (2013), evaluaron almidones altos en amilosa de maíz, los cuales exhibieron un aumento de la solubilidad

después de su modificación física mediante autoclaveado. En otra investigación se reportó que el tratamiento dual de autoclave-retrogradación de cuatro cultivares de arroz aumentó significativamente en la capacidad de absorción agua/aceite, la estabilidad al congelamiento-deshielo, y disminuyó el índice de hinchamiento y solubilidad (Ashwar *et al.*, 2016).

En el estudio sobre las modificaciones hidrotérmicas de nuevos almidones de cocoyam *X. sagittifolium*, el poder de hinchamiento y la solubilidad se redujeron con la modificación por calor y humedad a medida que aumentó el nivel de humedad. Estos tratamientos hidrotérmicos provocan una realineación de las fuerzas de unión en los gránulos de almidón, promoviendo la formación de agrupamientos ordenados de cadena lateral de amilopectina de doble hélice, limitando así el hinchamiento y la solubilidad del almidón. En cuanto a la capacidad de absorción de agua por parte de los almidones mejoró con estas modificaciones hidrotérmicas y se redujo su capacidad de absorción de aceite (Lawal, 2005).

2.3.5. Propiedades Térmicas del AR

En los estudios de análisis térmicos reportados por Aparicio-Saguilán *et al.* (2015) sobre plátano lintnerizado en diferentes tiempos de hidrólisis (3, 5 y 7 días), observaron que el almidón lintnerizado durante los tiempos más cortos (3 y 5 días) promovieron un incremento en los valores T_p (temperatura de pico de gelatinización), T_f (temperatura final de gelatinización) y entalpía de gelatinización (ΔH). En el mayor tiempo de tratamiento con ácido (7 días), la temperatura de inicio (T_i) y la T_f disminuyeron, pero los valores de ΔH aumentaron en comparación con aquellas muestras hidrolizadas por 3 y 5 días. En un estudio por Rivas-González *et al.* (2008) sobre almidón de plátano lintnerizado, observaron la formación de cristales más pequeños e imperfectos atribuido a los cambios menores en las entalpías de gelatinización y retrogradación, y el mayor grado de cristalinidad.

La temperatura pico y entalpía en almidones de malanga *X. sagittifolium* modificados por hidrólisis ácida, ha resultado similar al almidón nativo de esta misma fuente botánica (Lawal, 2004). En otro

estudio se analizó el almidón de sorgo lintnerizado a 0.1 y 1.0 M, donde se reportan valores de $T_i = 70.5$ °C, $T_p = 73.6$ y 73.9 °C, $T_f = 79.8$ y 81.2 °C, y ΔH de 9.1 y 9.6 J/g, destacando que la hidrólisis ácida, redujo la entalpía de gelatinización del almidón, en comparación con el nativo, atribuido al debilitamiento interno de las fuerzas que sostienen los gránulos (Mehboob *et al.*, 2015).

Después de los ciclos de autoclave y enfriamiento, las temperaturas del almidón de plátano aumentan notablemente con respecto al almidón nativo, en lo que respecta a la entalpía del almidón autoclaveado se ha demostrado que incrementa hasta cinco veces respecto al almidón nativo. Las altas temperaturas de transición y los valores de entalpía de las muestras autoclaveadas exhiben una notable estabilidad térmica de los almidones resistentes (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). Ashwar *et al.* (2016) reportan incrementos en las temperaturas de transición y entalpía con respecto a su homólogo nativo, debido a una interacción entre la amilosa y las ramas externas de la amilopectina, lo que requiere una temperatura mayor para interrumpir las regiones cristalinas.

2.3.6. Aspectos Moleculares (FTIR) del AR

Los espectros IR tienen tres picos de absorción característicos en 995, 1022 y 1047 cm^{-1} . Es decir, niveles más altos de relaciones 1047/1022 cm^{-1} o relaciones 995/1022 cm^{-1} , indican una mayor proporción de región cristalina en el almidón. Bao *et al.* (2017) reportan que el orden molecular de acuerdo con la relación 1047/1022 cm^{-1} evaluada por en almidones modificados por autoclave, ultrasonido-autoclave, enzimas-autoclave, microondas-humedad de *Semen coicis* fue de 1029, 1076, 1043 y 1118, respectivamente. El AR esta formadas por cadenas de almidón ordenadas. El grado de los valores de doble hélice, dado por la proporción 995/1022 cm^{-1} de almidones modificados por autoclave, ultrasonido-autoclave, enzimas-autoclave, microondas-humedad de esta misma fuente botánica fue de 1020, 1077, 1051 y 1114, respectivamente, indicando que la modificación por medio de microondas mejora la formación de doble hélice. Shah *et al.* (2016), mencionan que los espectros de almidón de avena con un tratamiento dual de autoclaveado-retrogradación, fueron de-convulados utilizando la proporción 1044/1022 cm^{-1} y la relación del

almidón nativo fue menor al almidón modificado, lo que podría deberse a una alineación paralela de cristales interrumpidos en la retrogradación

Chen *et al.* (2017) reportaron que los espectros de-convulados del almidón de kuduzu (*Pueraria*) fueron llevados a línea base de 1200-800 cm^{-1} , donde se observó que el pico de absorbancia 1048 cm^{-1} disminuía a medida que el grado de reticulación aumentaba, lo que significa que la estructura cristalina ordenada estaba desapareciendo. En la banda 1022 cm^{-1} característica de las vibraciones de los componentes amorfos, aumentó a medida que el grado de reticulación aumentaba, especialmente en almidón reticulado de kuduzu rico en amilopectina. Como resultado, la relación de las proporciones 1048/1022 cm^{-1} del almidón reticulado de kuduzu rico en amilosa y el almidón reticulado de kuduzu rico en amilopectina, disminuyó en comparación con el almidón nativo, indicando así, que la reticulación interrumpió la cristalinidad del almidón.

2.3.7. Propiedades Reológicas del AR

Siroha y Sandhu (2018), reportaron una disminución en el índice de consistencia (k) en los almidones de Pearl Millet (*P. glaucum* L.) -cereal cultivado en el continente africano-entrecruzados en comparación con su contra parte nativa, lo cual atribuyeron a una disminución en la solubilidad y poder de hinchamiento de los almidones reticulados, debido a una menor absorción de agua causada por el reactivo de reticulación. En cuanto al índice de flujo (n) este fue menor al valor de 1, lo cual es indicativo de un comportamiento de adelgazamiento del fluido causado por el cizallamiento, el cual se conoce como un comportamiento no-Newtoniano del tipo pseudoplástico. Resultados similares han sido reportados para almidones de avena modificados con un tratamiento dual de autoclave-retrogradación y en almidones de arrurruz (*M. arundinacea* L.) tratados con calor-humedad, donde el índice de consistencia (k) disminuye conforme a sus análogos nativos, lo cual es atribuido a la lixiviación de amilosa durante el proceso de modificación (Shah *et al.*, 2016; Pepe *et al.*, 2015). En cuanto a la variable del índice de comportamiento de flujo (n), Pepe *et al.* (2015) reportaron valores menores a uno, en almidones de arrurruz modificados físicamente, y lo clasificaron como un fluido del tipo pseudoplástico, donde la viscosidad

disminuye a medida que aumenta la velocidad de cizalla. Lo contrario sucedió con los almidones de avena (tratamiento dual), donde “*n*” fue mayor a uno, confirmando que dichas soluciones de almidón exhibieron comportamientos de espesamiento por cizalla (dilatante) (Shah *et al.*, 2016).

2.3.8. Aspectos Morfológicos (MEB) y Estructurales (Difracción de Rayos X) del AR

En microscopía electrónica de barrido (MEB) de almidones de plátano autoclaveados, se ha reportado una desaparición de la estructura granular en comparación con el almidón nativo, y se forman gránulos irregulares, debido a la agregación de fragmentos de almidón y a la retrogradación por los ciclos de autoclave y enfriamiento (Babu *et al.*, 2014). En almidones de arroz de dos variedades estudiadas, modificados por hidrólisis ácida o lintnerización, Moin *et al.* (2017) mencionan que este tratamiento no afecta significativamente la forma y el tamaño de los gránulos. El patrón de difracción de rayos X ha sido usado para revelar la presencia y características de la estructura cristalina de los gránulos de almidón. En almidones de maíz y jícama lintnerizados muestran un patrón de difracción similar a sus almidones nativos, donde el almidón de jícama muestra un patrón tipo B distintivo de los tubérculos con un pico fuerte a $2\theta = 17, 20, 22$ y 24° y el almidón de maíz un tipo A, característico de los cereales con picos fuertes en $2\theta = 15, 17, 18$ y 23° .

La cristalinidad relativa de los almidones de maíz hidrolizados disminuye durante la modificación química, mientras que los de jícama hidrolizados aumentan, esto lo atribuyen a que el almidón de jícama contiene menos amilosa en comparación con el almidón de maíz (Amaya-Llano *et al.*, 2011). La hidrólisis de las zonas amorfas permite la reorganización de los segmentos de las cadenas y la formación de una estructura más cristalina (Biliaderis *et al.*, 1980). La cristalinidad relativa de los almidones de maíz disminuye con la lintnerización, lo que indica estructuras internas más débiles como resultado del ataque con ácido (Amaya-Llano *et al.*, 2011).

El almidón de quinoa (*Chenopodium quinoa*) presenta un patrón de difracción de tipo A, común de los cereales. Ahmed *et al.* (2018) modificaron este almidón a alta presión y mantuvo un patrón de difracción un rango de presión de 300 a 450 MPa, sin embargo, al llegar a 600 MPa, los picos

del patrón de difracción desaparecieron completamente, lo que indica que los cristalitos de amilopectina se fundieron a 600 MPa y hubo un cambio de estado cristalino a un estado amorfo (fundido). Similares resultados fueron observados por Deka y Sit (2016) en almidón de malanga autoclaveado, el cual presentó una reducción en la intensidad de los picos en comparación con el almidón nativo, por lo tanto, la cristalinidad del almidón modificado también fue significativamente menor al nativo, sugiriendo una pérdida de la matriz cristalina por la ruptura de los puentes de hidrógeno, causando el desplazamiento de las hélices dobles adyacentes y la pérdida de cristalinidad.

2.3.9. Propiedades de Textura del AR

Las propiedades de textura se consideran importantes en la industria alimentaria ya que pueden determinar el tipo de aplicación de almidón y ayudan a comprender los cambios que ocurren en los almidones modificados química y físicamente (Da Rosa *et al.*, 2012). En relación con las propiedades de textura se ha observado que los tratamientos físicos de calor-humedad incrementan la dureza y la gomosidad en geles elaborados a base de almidón de arroz tratados con un 15 y 20% de humedad y calentados a 110 °C por 1 h (Da Rosa *et al.*, 2012).

Sozer *et al.* (2007) reportaron que espaguetis enriquecidos con almidón resistente tipo 3 presentan adecuadas propiedades de textura en comparación con los espaguetis que contienen salvado. Donde la dureza y la adhesividad del espagueti de salvado fueron superiores a los de almidón resistente, por lo tanto, este último (el espagueti adicionado con AR3) fue menos pegajoso y duro.

A almidones de yuca, camote y arrowroot (*M. arundinaceae*) tratados con calor y humedad (HTM), se les han determinado sus perfiles de textura antes y después del almacenamiento de sus pastas al 10% a 20 °C durante diferentes períodos, lo cual resultó una dureza más alta para el almidón de yuca modificado por calor-humedad que para el almidón nativo de este tubérculo, a diferencia de los almidones modificados con HTM de arrowroot y camote en los cuales la dureza fue menor (Jyothi *et al.*, 2010). Se ha visto también que, en almidones de sorgo modificados por hidrólisis

ácida, la dureza de los geles disminuye, debido a que la longitud de la cadena de amilosa se reduce; en cuanto a masticabilidad y gomosidad el almidón lintnerizado a 1 M muestra mayor consistencia en dichos parámetros, en comparación con su contraparte nativa, atribuido a una tendencia mayor a la gelificación de la cadena de almidón ligeramente hidrolizada (Menhboob *et al.*, 2015). Lo contrario es reportado en gomosidad y masticabilidad en almidones modificados químicamente de trigo y maíz, donde estos parámetros se ven disminuidos (Hedayati y Niakousari, 2018).

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la industria alimenticia busca fuentes alternativas para la obtención de almidones nativos que presenten cualidades idóneas para modificarse por métodos físicos y/o químicos con la finalidad de obtener AR con propiedades funcionales, reológicas y de textura similares al AR de fuentes convencionales (comerciales) como el maíz, el trigo o la papa. Como factibles fuentes alternativas de almidón nativo, existen frutos y tubérculos poco explorados, en este sentido, destacan la manzana y la malanga, debido a que presentan cantidades significativas de este carbohidrato y son cultivos importantes para la región noroeste y sur de la república mexicana, respectivamente. Estos podrían ser una alternativa para contrarrestar el incremento, dependencia y altas demandas comerciales de las fuentes convencionales que cada vez resulta más insostenible en países subdesarrollados o en desarrollo como México; sin embargo, se requieren estudios sobre la caracterización de sus respectivos almidones y la factibilidad de obtener AR con nuevas o diferentes propiedades funcionales que puedan otorgar valor agregado a estos cultivos.

4. HIPÓTESIS

La manzana y la malanga son fuentes no convencionales viables para la obtención de almidones nativos y sus respectivos almidones resistentes (tipos 3 y 4) presentan algunas características fisicoquímicas, funcionales, reológicas y de textura similares a las de almidones resistentes provenientes de fuentes convencionales como el maíz.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Obtener almidones resistentes tipo 3 y 4 de almidones nativos de maíz, malanga y manzana, y caracterizar sus propiedades fisicoquímicas, funcionales, reológicas y de textura.

5.2. Objetivos Específicos

1. Aislar el almidón nativo de maíz, malanga y manzana, y obtener el AR tipo 3 (autoclaveado) y tipo 4 (lintnerizado).
2. Caracterizar los almidones nativos y resistentes mediante estudios morfológicos, fisicoquímicos, funcionales, de textura, térmicos, estructurales y reológicos.
3. Cuantificar por técnicas enzimáticas el almidón total, disponible, resistente, y resistente retrogradado en las muestras de los almidones nativos y modificados.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Materiales

Se utilizaron manzanas de la variedad Golden Delicious Smoothie. Los frutos se obtuvieron a 70 días después de la plena floración (DDPF) y se proporcionaron por una huerta comercial, ubicada en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua (México). Se utilizó harina de cormos de malanga *X. sagittifolium* proporcionados por la Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). También, se empleó almidón comercial de maíz (Maizena).

Se aislaron almidones nativos de las fuentes botánicas y posteriormente se modificaron para obtener almidón resistente tipos 3 y 4 mediante el método físico en autoclave, y el método químico de lintnerización, respectivamente.

6.2. Métodos

6.2.1. Obtención de Almidón de Manzana

El almidón nativo de manzana se obtuvo en un tiempo máximo de 48 h posteriores a la cosecha de la fruta de acuerdo a la metodología reportada por Tirado-Gallegos *et al.* (2016). Las manzanas se lavaron y cortaron en trozos pequeños. Las piezas cortadas se remojaron en agua destilada con 0.16% de metabisulfito de potasio y se molieron en una licuadora (OSTERIZER, blender classic). La suspensión se tamizó a través de un tamiz de malla 100 (ASTM) y se dejó reposar bajo refrigeración (4 °C) durante 12 h. El sobrenadante se eliminó por decantación, y la capa de almidón asentado se re-suspendió en agua destilada y se centrifugó a $10,500 \times g$ durante 15 min. Se eliminó

la superficie verde del pellet obtenido con ayuda de una espátula. El pellet restante se homogenizó con agua destilada durante 10 min y se dejó reposar durante 24 h bajo refrigeración. El sobrenadante se decantó y nuevamente se lavó, este proceso se repitió al menos tres veces adicionales, hasta que el sobrenadante se observó claro y libre de restos de fibras y pigmentos sobre el almidón sedimentado. El almidón se colectó y se secó en una estufa con circulación de aire caliente a 40 °C durante 24 h. Finalmente se molió y tamizó en una malla 100 (ASTM) con una apertura de poro de 0.149 mm.

6.2.2. Obtención de Almidón de Malanga a Partir de Harina

El aislamiento del almidón se realizó de acuerdo con Dai *et al.* (2015), con modificaciones. Se suspendieron 100 g de harina en 500 mL de agua destilada y se homogenizaron durante 1 h en agitación constante a 300 rpm. La dispersión se tamizó a través de tela organza, el permeado se centrifugó (Allegra 64R) a $10,000 \times g$ por 10 min. El sobrenadante se descartó y los pellets se re-suspendieron en 1,000 mL de agua destilada, y se mantuvieron bajo agitación durante 30 min, esta dispersión se tamizó a través de un tamiz de malla 250. El tamizado se mezcló con 500 mL NaOH 0.05 M y se mantuvo bajo agitación a 300 rpm por 60 min, posteriormente se centrifugó (10 min a $10,500 \times g$). El sobrenadante se eliminó y la capa marrón (pigmentos, fibras y proteínas) en la superficie del pellet se desechó con ayuda de una espátula. Posteriormente, el almidón se lavó durante 30 min con HCl 0.1 M para su neutralización, la dispersión se centrifugó nuevamente a $10,500 \times g$ por 10 min. El sobrenadante se descartó y para eliminar los restos de NaCl, el almidón sedimentado se lavó con agua destilada (30 min, 300 rpm) y se centrifugó (10 min a $10,500 \times g$). El sobrenadante se decantó y el almidón se secó en una estufa de aire forzado a 40 °C, se molió en un mortero y se tamizó en una malla 100 (ASTM) para uniformizar el tamaño de la partícula.

6.2.3. Obtención de Almidón Resistente Tipo 3

Se realizó mediante la modificación física del almidón nativo por autoclaveado, de acuerdo con Berry (1986). Se mezclaron 100 g del almidón nativo con 350 mL de agua destilada y se agitaron por 15 min (IKA, RW 20 digital). La dispersión de almidón se sometió a calentamiento en autoclave (121-127 °C) por 1 h, se dejó enfriar para almacenarse a 4 °C por 24 h. Este proceso se repitió tres veces. Subsecuentemente, el almidón se sometió a un proceso de liofilizado (LABCONCO) por 72 h y posteriormente, se molió en un molino (IKA M 20 S3).

6.2.4. Obtención de almidón Resistente Tipo 4

Se obtuvo mediante la modificación química de lintnerización (hidrólisis ácida), de acuerdo con Rivas-González *et al.* (2008). 100 g de almidón nativo de manzana se mezclaron con 200 mL de HCl 1 M y se agitaron por 6 h a 50 rpm y 35 °C. Enseguida se agregaron 200 mL de NaOH 1 M (pH 6.0). Los sólidos del almidón se centrifugaron (Allegra 64R) 6 veces utilizando en cada ocasión 2,000 mL de agua destilada. Posteriormente se secaron en una estufa a 37 °C por 48 h.

6.2.5. Análisis Químico Proximal

Los siguientes análisis se realizaron a los almidones nativos y a los almidones resistentes. Se utilizaron los métodos oficiales de análisis de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists) descritos en la 17^a Edición (2002), extracto etéreo (954.18, subcapítulo 4.5.02.), humedad (método 934.01 subcapítulo 4.1.03), cenizas (método 942.05 subcapítulo 4.1.10), proteínas (991.20 Subcapítulo. 33.2.11). Finalmente, el contenido de carbohidratos se determinó mediante el cálculo por diferencia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ carbohidratos} = 100 - (\% \text{ humedad} + \% \text{ grasa} + \% \text{ proteína} + \% \text{ ceniza}) \quad (1)$$

6.2.6. Medición del Color

Se realizó utilizando un colorímetro Minolta (Modelo CR-300, Osaka, Japón) y se reportaron las variables de color de acuerdo con el sistema CIELAB (L, a*, b*) además de las variables de croma (saturación del color) y °hue (tonalidad). El instrumento fue calibrado contra un mosaico de referencia de color blanco. Las mediciones se realizaron en una celda de vidrio que contenía el almidón en polvo sobre la fuente de luz -esta celda estaba colocada sobre una base blanca- (Aboubakar *et al.*, 2008), los valores fueron registrados por quintuplicado para cada almidón.

6.2.7. Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido

Se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Saltillo. Utilizando un microscopio de barrido marca JEOL (modelo JSM5800 LV). Las muestras de almidón se suspendieron en etanol para obtener una suspensión al 1% (p/v). Una gota de la suspensión de almidón-etanol se aplicó sobre un trozo de aluminio, y el almidón se cubrió con los metales oro-paladio (60:40). Se utilizó un potencial de aceleración de 10 kV durante la observación micrográfica.

6.2.8. Propiedades Físicoquímicas

6.2.8.1. Contenido De Amilosa Aparente. Se realizó en el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional (CEPROBI-IPN). Los almidones se desgrasaron en un

Soxhlet y una solución de metanol al 85% por 24 h. Subsecuentemente, se lavaron con etanol y se recuperaron por filtración. Las afinidades de yodo de los almidones desgrasados se midieron utilizando un valorador potenciométrico automático (702 SM Tirino, Metrohm, Herisau, Suiza). El contenido aparente de amilosa se calculó dividiendo la afinidad con yodo de los almidones desgrasados por 20% (Espinosa-Solís *et al.*, 2009).

6.2.8.2. Determinación del peso molecular (PM). Se realizó en el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional (CEPROBI-IPN) y se utilizó la metodología reportada por Torruco-Uco *et al.* (2016). Para lo cual, se emplearon estándares de pululanos de diversas masas molares (1.6×10^6 , 3.8×10^5 , 1.8×10^5 , 1.0×10^5 , 4.8×10^4 y 1.2×10^4 g/mol) para obtener una calibración lineal. Los pululanos se disolvieron en agua grado HPLC a 25 °C mantenidos en oscuridad (por la noche), se filtraron utilizando un filtro de jeringa de nylon de 0.2 μm y se inyectaron en el sistema HPSEC-RI. El procedimiento de solubilización de amilosa se realizó con 50 s de calentamiento por microondas. La solución sobrenadante se filtró a través de un filtro de jeringa de nylon de 5 μm . La solución se inyectó (50 μL) en el equipo HPLC AT 1100 (Agilent Technology, Deutschland GmbH Waldbronn, Alemania) con la cromatografía de permeación en gel-cromatografía de exclusión por tamaño (HPSEC) PL aquagel-OH mezclado, columna de 8 μm (7.5 mm ID \times 300 mm; Agilent Technologies Deutschland GmbH Waldbronn, Alemania). La columna y el detector se mantuvieron a 30 °C. Se utilizó agua de grado HPLC como diluyente, desgasificando cuidadosamente y filtrando antes de su uso a través de membranas Durapore GV (0.2 μm). Se utilizó un flujo de 1.0 mL/min. El análisis de los datos se realizó utilizando el software GPC de Agilent (Agilent Technologies Deutschland GmbH Waldbronn, Alemania). La concentración de carbohidratos de la solución sobrenadante después de la filtración se midió por el método colorimétrico de ácido sulfúrico-fenol. El procedimiento se realizó al menos por quintuplicado para cada muestra.

6.2.9. Propiedades Funcionales

Se consideraron como las principales propiedades funcionales el poder de hinchamiento, índice de

solubilidad e índice de absorción de agua.

6.2.9.1. Índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y poder de hinchamiento. Se realizaron de acuerdo con Anderson (1969), con modificaciones, a diferentes temperaturas 60, 70 y 80 °C. Se pesaron 0.444 g (bs) de almidón y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL de polipropileno (Corning ®), se les adicionaron 10 mL de agua destilada previamente calentada a las temperaturas arriba mencionadas. Las muestras en suspensión se colocaron en un baño de agua por 30 min, separados por temperatura, y agitados con un vortex (Corning LSE 6775 de 120 V) por 1 min a los 10 y 20 min, respectivamente, después de iniciado el calentamiento. Las suspensiones se centrifugaron a $6500 \times g$ a temperatura ambiente (~ 24 °C) por 30 min. Posteriormente, se tomó 10 mL de sobrenadante con material soluble con una pipeta graduada (KIMAX-51) de 10 mL, se colocó en una charola de aluminio y se secó a 100 °C por 4 h. Subsecuentemente, se pesó el tubo que contenía el material insoluble gelificado. Los índices y el poder de hinchamiento se determinaron por triplicado de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$IAA = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso muestra (g)bs}} \quad (2)$$

$$ISA = \frac{\text{Peso soluble (g)}}{\text{Peso muestra (g)bs}} \quad (3)$$

$$\text{Poder de hinchamiento} = \frac{\text{Peso gel (g)}}{\text{Peso muestra (g)bs} - \text{peso soluble (g)}} \quad (4)$$

6.2.10. Determinaciones Enzimáticas del Almidón y sus Componentes

6.2.10.1. Almidón total (AT). Se cuantificó el contenido de AT de cada una de las muestras mediante una determinación que estima la cantidad total de almidón que está disponible a la hidrólisis enzimática. Esta determinación se realizó de acuerdo con Goñi *et al.* (1996) para lo cual se dispersaron 50 mg de almidón en una solución de KOH 2 M, para hidrolizar todo el almidón que pudiera contener la muestra por 30 min y posteriormente se incubó a 60 °C por 45 min (pH de 4.75) con una solución de la enzima amiloglucosidasa (Marca Roché, núm. 102 857, Roche Diagnostics, IN, EUA), transcurrido este tiempo, se determinó el contenido de glucosa liberada utilizando el ensayo de glucosa oxidasa/peroxidasa (GOD/PAD) (SERA-PAK® Plus, Bayer de México, S.A. de C.V.). El contenido de AT se calculó como glucosa (mg) \times 0.9, como referencia se utilizó almidón de papa.

6.2.10.2. Almidón disponible (AD). Esta determinación se realizó de acuerdo con Holm *et al.* (1989). A 500 mg de muestra se le agregaron 20 mL de agua destilada. Se agitó por 10 min y posteriormente se agregaron 100 mL de Termamyl. Después se colocaron en baño a ebullición por 20 min y se agitaron cada 5 min hasta completar los 20 min; consecutivamente, después se dejó reposar hasta la temperatura de 30-40 °C y se transfirió a un matraz aforado de 100 mL. En un tubo de vidrio se colocó 1 mL de buffer de acetato de sodio a un pH 4.75, 25 mL de amiloglucosidasa y 500 mL de muestra del matraz aforado de 100 mL, los cuales se incubaron por 30 min a 60 °C, en agitación constante. El contenido del tubo se transfirió a un matraz aforado de 10 mL y se tomaron 50 mL de la muestra para determinar la glucosa liberada por digestión enzimática, mediante el método GOD/PAD (glucosa/oxidasa peroxidasa), leyendo las densidades ópticas de las muestras a 510 nm en un espectrofotómetro Spectronic Genesis 5 (Spectronic Instrument, Inc Rochester, NY, EUA). Leyendo las densidades ópticas de las muestras a 510 nm en un espectrofotómetro Spectronic Genesis 5 (Spectronic Instrument, Inc Rochester, NY, EUA).

6.2.10.3. Almidón resistente (AR). Para determinar el contenido de almidón indigerible, se utilizó la metodología descrita por Goñi *et al.* (1996). Se pesaron 100 mg de almidón en un tubo de centrifuga y se agregó 10 mL de buffer de KCl-HCl pH 1.5 y posteriormente, 200 mL de solución de pepsina (la solución de pepsina se preparará en una relación de 25 mg de pepsina con 250 mL de buffer KCl-HCl por muestra). La muestra se mezcló y dejó en agua a 40 °C por 60 min con agitación constante. Transcurrido el tiempo se dejó reposar la muestra a temperatura ambiente y se adicionó 9 mL de buffer de trismaleato a pH 6.9 y posteriormente, 40 mg de α -amilasa (290 U/mg, de la marca Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) y se mezcló e incubó por 16 h en baño María a 37 °C con agitación constante, subsecuentemente, la muestra se centrifugó (Allegra 64R) por 15 min a $3000 \times g$ a 4 °C. Se descartó el sobrenadante y se lavó 2 veces con 10 mL de agua destilada, se centrifugó nuevamente y se descartó el sobrenadante. En seguida, se adicionaron 3 mL de agua destilada y 3 mL de KOH 4 M, y se dejó reposar por 30 min a temperatura ambiente con agitación constante. Se adicionaron 5.5 mL de HCL 2 M y 3 mL de buffer de acetato de Na 0.4 M (pH 4.75) y subsecuentemente, 25 mL de amiloglucosidasa e inmediatamente fueron adicionados, se dejó 45 min en baño de agua a 60 °C con agitación constante. La muestra se centrifugó por 15 min a $3000 \times g$ a 4 °C y el sobrenadante se recolectó y llevó a un matraz aforado de 50 mL. El residuo se lavó dos veces más con 10 mL de agua destilada en cada ocasión y el sobrenadante se combinó con el obtenido previamente. Posteriormente, se aforó a 50 mL y se tomaron 50 mL de muestra para determinar la glucosa liberada por digestión enzimática, mediante el método GOD/PAD (glucosa/oxidasa peroxidasa, SERA-PAK® Plus, Bayer de México, S.A. de C.V.), leyendo las densidades ópticas de las muestras a 510 nm en un espectrofotómetro Spectronic Genesis 5 (Spectronic Instrument, Inc Rochester, NY, EUA).

6.2.10.4. Almidón resistente retrogradado (ARr). Para la determinación del contenido de almidón indigerible en muestras vegetales, se siguió la metodología descrita por Saura-Calixto *et al.* (1993). Se colocaron 100 mg de almidón en un tubo para centrífuga y se adicionaron 10 mL de búfer de fosfatos 0.08 M a pH 6.0. Se agregaron 10 mL de α -amilasa termoestable (290 U/mg, de la marca Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) y se incubaron en baño María a ebullición por 30 min con agitación constante, subsecuentemente, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se adicionaron 2 mL de NaOH 0.0275 N, posteriormente se agregaron 100 μ L de proteasa (170 U/mg, de la marca

Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) y se incubó a 60 °C por 30 min con agitación constante y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se agregaron 2 mL de HCL 0.325 N y 60 µL de amiloglucosa (15 U/mL, de la marca Roché, IN, EUA) y se dejó incubar a 60 °C por 30 min. La muestra se centrifugó 15 min a 3000 × g a 4 °C y se descartó el sobrenadante. El residuo se lavó con 10 mL de agua destilada, 10 mL de alcohol al 96% y 10 mL de acetona y posteriormente se centrifugó y descartó el sobrenadante. Al residuo se le agregaron 3 mL de agua destilada y se dispersó. Posteriormente se adicionaron 3 mL de KOH 4 M, se mantuvo en agitación por 30 min a temperatura ambiente (25 ± 3 °C), además se adicionaron 5.5 HCL 2 N y 3 mL de búfer de acetatos a pH 4.78 y 60 µL de amiloglucosa (15 U/mL, de la marca Roché, IN, EUA). Se incubó a 60 °C por 30 min con agitación constante. Después se centrifugó a 3000 × g por 15 min a 4 °C y se guardó el sobrenadante y el residuo se re-suspendió en 10 mL de agua destilada, la centrifugación se repitió 2 veces más. Al residuo se le adicionaron 3 mL de agua destilada y 3 mL de KOH 4 M y se mantuvo en agitación constante por 30 min a temperatura ambiente. Se agregaron 5.5 de HCl 2 N y 3 mL de búfer de acetatos a pH 4.78, se adicionaron 60 mL de amiloglucosidasa (15 U/mL, de la marca Roché, IN, EUA) y se colocó en incubación a 60 °C por 30 min en agitación constante. Posteriormente se centrifugó a 3000 × g por 15 min a 4 °C. El sobrenadante se guardó y re-suspendió en 10 mL de agua destilada. Se repitió la centrifugación y se colectaron los sobrenadantes y se aforaron a 100 mL. 50 µL se usaron para determinar el contenido de glucosa mediante el método de GOD/PAD (glucosa/oxidasa peroxidasa, SERA-PAK® Plus, Bayer de México, S.A. de C.V.), leyendo las densidades ópticas de las muestras a 510 nm en un espectrofotómetro Spectronic Genesis 5 (Spectronic Instrument, Inc Rochester, NY, EUA).

6.2.11. Análisis de Perfil de Textura (TPA)

El “Análisis de Perfil de Textura” (TPA) se llevó a cabo con un equipo analizador de textura (texturómetro) TA.XTplus (Stable Micro Systems, Surrey, U.K.). Se prepararon geles de almidones nativos y modificados, para los cuales se utilizó una concentración de la suspensión de almidón al 6%. Las suspensiones se calentaron a 95 °C por 30 min, luego se enfriaron a 50 °C. Las pastas formadas se colocaron en porciones de 40 mL en vasos de precipitado de 50 mL y se

enfriaron a temperatura ambiente; posteriormente se almacenaron a 4 °C por 24 h. Los geles formados en los vasos de precipitado se utilizaron directamente en el análisis de perfil de textura, para lo cual a cada gel se le practicó una punción de 10 mm de profundidad con una sonda cilíndrica P/25 de 25 mm de diámetro. Se obtuvieron dos curvas de fuerza vs tiempo con una velocidad de 1.0 mm/s, durante dos ciclos de penetración. Todo el procedimiento se realizó por triplicado a cada gel (Rondán-Sanabria *et al.*, 2009).

6.2.12. Análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido

Se realizó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) utilizando un calorímetro diferencial de barrido modelo 4000 (Perkin Elmer, Massachusetts, USA). Se empleó el método propuesto por Paredes-López *et al.* (1994). Para lo cual se mezclaron 2 mg de almidón con 7 µL de agua desionizada en una celda de aluminio, la celda se selló y dejó equilibrar por 1 h. Se evaluaron por medio del programa TA Universal Analysis 2000 versión 4.7, con las siguientes condiciones de proceso: una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, iniciando a 30 °C hasta 120 °C. De los termogramas obtenidos, se estudiaron las diferentes temperaturas de transición (temperatura de inicio de gelatinización = T_i ; temperatura de pico de gelatinización = T_p ; temperatura final de gelatinización = T_f ; y entalpía de gelatinización = ΔH). Esta determinación se realizó por triplicado.

6.2.13. Análisis de Difracción de Rayos X

El análisis estructural de los almidones se realizó mediante difracción de rayos X para determinar el porcentaje de cristalinidad de los almidones. Los patrones de difracción de rayos X se obtuvieron por el método de Jovanovich *et al.* (1992) modificado por Planchot *et al.* (1995), con la ayuda de un difractómetro de rayos X Analytical X'pert PRO X' Celerator con las siguientes condiciones de operación: Una radiación $\lambda_{CuK\alpha 1} = 0.15405$ nm, un voltaje de 40 kV y 25 mA, con una velocidad

de graficación de 0.0607 °/s. El porcentaje de cristalinidad se calculó de acuerdo con Amaya-Llano et al. (2011) con la siguiente formula:

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{\text{área cristalina}}{\text{área total}} \times 100 \quad (5)$$

6.2.14. Análisis de Espectroscopía Infrarroja

Se realizó mediante espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) con la ayuda de un espectrofotómetro de infrarrojo de la serie UATR TWO (Marca Perkin Elmer, Massachusetts, USA) y con el sistema de reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés) mediante cristal de diamante a 25 ± 2 °C. Para cada almidón se colectaron 32 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} y de éstos se obtuvieron valores promedio. Se trabajó en la región de 400 a 4000 cm^{-1} (región en la cual se identifican las características específicas y los grupos funcionales del almidón). Cada almidón se analizó por triplicado. Los espectros se corrigieron en la línea base a 1200 y 800 cm^{-1} y se de-convularon de acuerdo con Ye *et al.* (2018). Se utilizó un ancho de banda de 26 cm^{-1} y un factor de de-convolución de 2.4. Las mediciones de intensidad se realizaron en los espectros de-convulados registrando la altura de absorbancia desde la línea base. Las relaciones de altura de absorbancia 1022 cm^{-1} y 1047 cm^{-1} se obtuvieron de los espectros de-convulados.

6.2.15. Análisis de Reología

Las pruebas reológicas se realizaron mediante un reómetro con control del esfuerzo AR1500ex (TA Instruments, New Castle, DE, EUA) equipado con un baño de recirculación de agua y una geometría de placas paralelas de acero inoxidable (60 cm de diámetro) adaptado con el sistema Peltier para el control de diferentes temperaturas (25, 50 y 70 °C) y utilizando un espacio de 1000 μm entre placas. El sistema de placas se cubrió con aceite mineral para evitar la evaporación del

agua durante la prueba. La cantidad de muestra utilizada fue de 3.5 mL a la concentración de 7.5% (p/p) de sólidos totales en agua destilada, bajo agitación constante por 15 min. El reómetro se programó para calentar y enfriar la muestra a una velocidad de corte y calentamiento constantes de 50 s^{-1} y $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, respectivamente. La muestra se calentó de 25 a $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ manteniéndose a esta temperatura por 10 min, subsecuentemente, se enfrió a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando la muestra alcanzó la temperatura final de enfriamiento deseada ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), se realizaron tres barridos rotacionales para evaluar las propiedades de flujo. El primero, a una velocidad de corte de 3×10^{-6} a 600 s^{-1} por 10 min, el segundo, de 600 a $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ por 10 min y el tercer barrido de 3×10^{-6} a 600 s^{-1} por 10 min. Este procedimiento se realizó a las tres temperaturas mencionadas (25 , 50 y $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para cada uno de los almidones. La viscosidad aparente (η_{ap}) se determinó en función del incremento de la velocidad de corte de 0.1 a 600 s^{-1} y observando el esfuerzo cortante como variable de respuesta. Los resultados se ajustaron utilizando el modelo reológico de Ostwald-de Wael también conocido como la Ley de Potencia (Sánchez-Rivera *et al.*, 2013): $\tau = k \gamma^n$; donde: τ = Esfuerzo cortante (Pa), γ = Velocidad de corte o deformación (s^{-1}), k = Índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n = Índice de comportamiento de flujo (adimensional) (Steffe, 1992; Tecante y Doublier, 1999).

6.2.16. Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con un tamaño de muestra de al menos tres ($n \geq 3$) por cada análisis experimental. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía, y cuando se observaron diferencias significativas se realizó la prueba de Tukey para la separación de medias con un valor de $P \leq 0.05$.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Análisis Químico Proximal

El análisis químico proximal se muestra en el Cuadro 3. El contenido de humedad en los polvos es un factor importante en el flujo y otras propiedades mecánicas, y es dependiente en gran medida del método, el grado o nivel de secado y la humedad en la atmósfera circundante (Shieldneck y Smith, 1971). Los almidones N-MAL, AR4-MANZ, AR4-MAL y N-MANZ mostraron los valores más altos de humedad (16.46, 14.77, 14.02 y 13.21%, respectivamente) aunque sin diferencias significativas entre ellos ($P > 0.05$). Todos los almidones sometidos a autoclaveado mostraron los menores porcentajes de humedad, con el siguiente orden descendente: AR3-MANZ > AR3-MAÍZ > AR3-MAL, pese a esto, no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre ellos. Al respecto, se han reportado valores de humedad menores en almidones nativos de maíz (6.5-8.5%) (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2018), en almidón nativo de avena (10.03-10.63%) (Shah *et al.*, 2016) y en almidón nativo de plátano (4.89%) y lintnerizado (7.99%) (Aparicio-Sanguilán *et al.*, 2005).

Los componentes (lípidos y proteínas principalmente), pueden influir en la funcionalidad del gránulo de almidón; la proteína se asocia con la dureza del grano, mientras que los lípidos pueden reducir significativamente la capacidad de hinchamiento de la pasta de almidón (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2018). Los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana presentaron valores menores al 1% de proteínas, lípidos y cenizas; con lo que se disminuiría estos componentes contaminantes del almidón, revelando que dichos almidones fueron extraídos con alta pureza (Lawal, 2004). Diversas investigaciones han reportado resultados similares en almidones nativos de maíz, papa, cassava (Waterschoot *et al.*, 2015), malanga (Deka y Sit, 2016) y arroz (Ashwar *et al.*, 2016; Van Hung *et al.*, 2016).

En el Cuadro 3, se muestra que el proceso de lintnerización disminuyó el contenido de proteínas, lípidos y cenizas en AR4-MAL existiendo diferencias significativas ($P < 0.05$), con respecto a su homólogo nativo; sin embargo, en AR4-MAÍZ y AR4-MANZ, esta disminución solo se observó

en proteínas y cenizas (estadísticamente significativa, $P < 0.05$). Dicha disminución se atribuye a que el ácido utilizado en la lintnerización solubilizó una porción importante de estos componentes (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). Después de la modificación por autoclaveado del almidón nativo, el contenido de proteínas, lípidos y cenizas disminuyó; esto se debió a que el tratamiento térmico desnaturalizó las proteínas y saponificó los lípidos (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). En la muestra AR3-MAL, su disminución en el contenido de proteínas fue significativa ($P < 0.05$) en comparación con su almidón nativo. Para el AR3-MANZ los contenidos de proteínas y lípidos disminuyeron significativamente ($P < 0.05$); mientras que, en los AR3 de maíz, malanga y manzana, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de cenizas en relación a sus respectivos almidones nativos, esto posiblemente se debió a que la temperatura utilizada en el proceso de autoclaveado no fue lo suficientemente alta como para destruir los minerales presentes en el almidón (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). Estos resultados son congruentes con lo reportado por Aparicio-Saguilán *et al.* (2005) en almidones de plátano autoclaveados y Deka y Sit (2016) quienes reportaron un comportamiento similar en almidones de malanga modificados con tratamiento de calor-humedad.

En relación al contenido de carbohidratos, no se observó una tendencia clara o definida, en este sentido los tratamientos de autoclaveado en general presentaron los valores más altos; mientras que el tratamiento de lintnerización no provocó cambios significativos ($P > 0.05$) con respecto a su almidón nativo. Esto pudo deberse a que los valores de estos componentes se obtuvieron por diferencia, lo cual está relacionado con el valor de los otros componentes (humedad, proteínas, lípidos y cenizas). Esto ha sido anteriormente reportado por Vargas *et al.* (2016) en almidones acetilados de papa.

En cuanto a las similitudes entre la fuente convencional y las no convencionales en esta determinación, el N-MAL y N-MANZ fueron similares en el contenido de lípidos y cenizas al N-MAÍZ. El AR3-MAL fue similar en el contenido de proteínas al AR3-MAÍZ, mientras que AR3-MANZ en lípidos y ceniza. El AR4-MAZ fue similar en lípidos, proteínas y ceniza al AR4-MAÍZ, y el AR4-MAL solo en lípidos y cenizas.

Cuadro 3. Análisis químico proximal (%) de almidones nativos y modificados de maíz, manzana y malanga.

Muestra	Humedad	Proteínas	Lípidos	Ceniza	Carbohidratos ¹
N-MAÍZ	11.12 ± 0.62 ^{bc}	0.35 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.03 ^{abcd}	0.09 ± 0.02 ^{bcd}	88.29 ± 0.11 ^{bc}
AR3-MAÍZ	8.73 ± 0.46 ^{cd}	0.30 ± 0.01 ^{bc}	0.11 ± 0.07 ^{abcd}	0.07 ± 0.01 ^{cde}	90.77 ± 0.09 ^{ab}
AR4-MAÍZ	11.45 ± 0.90 ^{bc}	0.20 ± 0.01 ^{de}	0.12 ± 0.01 ^{abcd}	0.03 ± 0.01 ^e	88.20 ± 0.19 ^{bcd}
N-MAL	16.46 ± 0.22 ^a	0.42 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.03 ^a	0.14 ± 0.01 ^{ab}	82.71 ± 0.05 ^e
AR3-MAL	6.05 ± 0.72 ^d	0.33 ± 0.01 ^b	0.23 ± 0.03 ^{ab}	0.15 ± 0.01 ^a	93.24 ± 0.14 ^a
AR4-MAL	14.02 ± 1.02 ^{ab}	0.29 ± 0.02 ^{bc}	0.10 ± 0.00 ^{bcd}	0.07 ± 0.00 ^{cde}	85.52 ± 0.19 ^{cde}
N-MANZ	13.21 ± 0.63 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^{cd}	0.17 ± 0.03 ^{abc}	0.11 ± 0.01 ^{abc}	86.26 ± 0.12 ^{cd}
AR3-MANZ	9.24 ± 0.53 ^{cd}	0.19 ± 0.01 ^e	0.0 ± 0.0 ^d	0.06 ± 0.00 ^{cde}	90.51 ± 0.10 ^{ab}
AR4-MANZ	14.77 ± 0.54 ^a	0.18 ± 0.02 ^e	0.07 ± 0.03 ^{cd}	0.05 ± 0.00 ^{de}	84.94 ± 0.10 ^{de}

Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra, dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). ¹Los carbohidratos totales se obtuvieron por diferencia (100% - % resto de los demás componentes). La nomenclatura empleada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.2. Determinación del Color

En el Cuadro 4 se muestran los atributos de color de los almidones nativos y modificados (resistentes) de maíz, manzana y malanga. El color es un criterio indicador de calidad en el uso industrial de los almidones, donde los almidones blancos indican un menor contenido de proteínas y pigmentos. Para una mayor aceptación del almidón, este no debe presentar ninguna coloración (Radley, 1976). La mayoría de los almidones mostraron valores de luminosidad (L) superiores a 90, por lo que se puede considerar que presentaron elevada blancura, si se estima que un valor de 100 para L es totalmente blanco (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016); sin embargo, el AR3- MANZ y el AR3-MAL, presentaron menores valores en L (90.47; 85.55 respectivamente). Esto concuerda con lo descrito por Deka y Sit (2016) donde su almidón modificado físicamente presentó menores valores de luminosidad conforme a su contraparte nativa. En los AR4, la blancura o luminosidad (L) fue similar a los almidones nativos, debido al uso de NaOH durante el proceso de lintnerización, el cual tuvo un efecto blanqueador (Ashwar *et al.*, 2017).

Con respecto a los valores de la tonalidad (o coordenada) a^* (rojo/verde) y b^* (amarillo/azul), el AR3 de malanga exhibió los valores más altos de a^* y b^* (1.72 y 4.53, respectivamente) y el AR3-MANZ en la coordenada b^* (5.21). Estos resultados son similares con los estudios reportados por Deka y Sit (2016) y Aboubakar *et al.* (2008) en almidones de malanga. El cambio de color observado en los AR3 podría atribuirse a la reacción de Maillard entre los azúcares reductores del almidón y los grupos amino en la proteína durante el autoclaveado (Shah *et al.*, 2016; Gani *et al.*, 2016). En relación a la variable de $^{\circ}$ hue, esta tiene un valor de 0° para el color rojo, 90° para el amarillo, 180° para el verde y 270° para el azul (Whale y Singh, 2007). El AR4 de manzana mostró el valor más alto en esta variable (280.72), confiriendo tonalidades azules, seguido del AR4, AR3 y nativo de maíz, mostrando tonalidades amarillas; mientras que los valores más bajos se observaron en los almidones obtenidos de malanga AR4 (41.80), N (61.46) y AR3 (68.36), mostrando tonalidades rojas. Dichas tonalidades en los almidones pueden deberse a la presencia de pigmentos en cada una de las fuentes botánicas utilizadas (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016).

En la variable croma (saturación o intensidad del color), no se observó alguna tendencia entre los almidones nativos y modificados. El AR3 de manzana reveló mayor valor en croma (5.26), el cual fue estadísticamente significativo al resto de los almidones analizados, seguido por el AR3-MAL (4.66). En los almidones nativos el valor de croma se determinó en un intervalo de 1.33-3.13, estos valores son menores a los reportados por García-Tejeda *et al.* (2011) en almidón nativo de plátano (10.95); sin embargo, los valores de croma evaluados en nuestro estudio son mayores que los obtenidos por Tirado-Gallegos *et al.* (2016) en almidón de manzana (intervalos de 0.20-1.70). Los almidones autoclaveados presentaron mayores valores (2.21-5.26) que los lintnerizados (0.49-1.32). García-Tejeda *et al.* (2011) reportaron un valor de 5.75 en croma para almidón oxidado de plátano, el cual es superior a los encontrados en este estudio para almidones modificados químicamente por hidrólisis ácida. Algunos autores han reportado que los valores de croma cercanos a cero se relacionan con la blancura del almidón (García Tejada *et al.*, 2011; Tirado-Gallegos *et al.*, 2016). Lo que implica que los almidones lintnerizados del presente estudio son más blancos que los autoclaveados, siendo favorable para su uso industrial, ya que esto es representativo de calidad y pureza.

De manera general, los almidones nativos y lintnerizados de malanga y manzana fueron diferentes en L, a*, Croma y °hue con el almidón nativo y con el AR4 de maíz, respectivamente, a excepción de la coordenada b*, donde se observó que el N-MANZ fue similar al valor obtenido en N-MAÍZ y el AR4-MANZ fue similar con el AR4-MAÍZ. Concerniente a los almidones autoclaveados de malanga y manzana, estos presentaron diferencias en L, a*, b*, Croma y °hue con respecto al AR3-MAÍZ.

Cuadro 4. Variables de color de almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.

Muestra	L	a*	b*	Croma	° hue
N-MAÍZ	99.56 ± 0.01 ^a	-1.39 ± 0.01 ^g	2.81 ± 0.00 ^c	3.13 ± 0.01 ^c	116.32 ± 0.18 ^c
AR3- MAÍZ	97.52 ± 0.00 ^b	-0.81 ± 0.00 ^e	2.06 ± 0.02 ^d	2.21 ± 0.01 ^d	111.40 ± 0.27 ^{cd}
AR4-MAÍZ	99.20 ± 0.01 ^a	-1.01 ± 0.01 ^f	-0.49 ± 0.01 ^g	1.32 ± 0.01 ^e	139.44 ± 0.63 ^b
N-MAL	96.00 ± 0.33 ^c	0.63 ± 0.01 ^b	1.18 ± 0.07 ^c	1.33 ± 0.07 ^e	61.46 ± 1.42 ^f
AR3-MAL	85.55 ± 0.13 ^f	1.72 ± 0.03 ^a	4.53 ± 0.32 ^b	4.66 ± 0.13 ^b	68.36 ± 0.21 ^f
AR4-MAL	97.43 ± 0.09 ^b	0.39 ± 0.07 ^c	0.36 ± 0.07 ^f	0.53 ± 0.10 ^f	41.80 ± 3.74 ^g
N-MANZ	96.42 ± 0.03 ^c	-0.81 ± 0.02 ^c	2.37 ± 0.03 ^{cd}	2.51 ± 0.03 ^d	108.82 ± 0.61 ^d
AR3-MANZ	90.47 ± 0.09 ^e	0.71 ± 0.00 ^b	5.21 ± 0.06 ^a	5.26 ± 0.06 ^a	82.3 ± 0.11 ^e
AR4-MANZ	94.43 ± 0.09 ^d	0.09 ± 0.02 ^d	0.49 ± 0.04 ^g	0.49 ± 0.04 ^f	280.72 ± 2.39 ^a

Media aritmética de al menos cinco repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra, dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). La nomenclatura empleada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.3. Estudios Morfológicos

Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) de los almidones nativos y modificados (resistentes) de maíz, malanga y manzana se muestran en la Figura 1. El almidón nativo de maíz mostró formas poliédricas o poligonales, lo cual está de acuerdo con estudios morfológicos reportados recientemente en almidones de este tipo de fuente vegetal (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2018; Waterschoot *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2003). Adicionalmente, se han reportado formas poligonales en almidón de amaranto (Hoover *et al.*, 1998) y en almidón de arroz (Zhou *et al.*, 2014).

Se apreciaron formas redondas y de domo en el almidón nativo de manzana. Las formas redondas son similares a los observados por Singh *et al.* (2005) en gránulos de almidón de manzanas inmaduras de distintos cultivares (Criterion, Ruspippum, Red Spur, Skyline Supreme, y Granny Smith), y por Stevenson *et al.* (2006) en almidón de manzana de diferentes variedades (Gala, Golden Delicious, Granny Smith, Jersey mac, Jonagold y Royal Gala). Recientemente, Tirado-Gallegos *et al.* (2016) reportaron formas esféricas, de domo y redondas en almidón nativo de manzana Golden Delicious Smothee. La forma de domo (redonda) se ha observado en otros almidones de frutos como el kiwi (*A. deliciosa*, ‘Hayward’) (Stevenson *et al.*, 2006) y jaca (*A. heterophyllus* Lam.) (Kittipongpatana *et al.*, 2011).

Por su parte el almidón nativo de malanga mostró formas poliédricas. Esto es característico de los almidones nativos de esta fuente botánica (Deka y Sit, 2016; Aboubakar *et al.*, 2008; Lawal, 2005 y Lawal, 2004). Ramírez-Miranda *et al.* (2017) reportaron formas similares en jícama (*P. erosus* L. Urban), la cual, al igual que la malanga, también es un tubérculo. En todos los AR3, se observaron modificaciones en la estructura granular y pérdida de la integridad física de los gránulos, lo cual se observa como una morfología irregular, a diferencia de su contraparte nativa. Esto puede deberse al tratamiento térmico mayor a 50 °C, donde la zona amorfa absorbe más agua produciendo así, un cambio en la estructura granular. Lo anterior se considera un proceso irreversible, es decir, la estructura del gránulo queda destruida. Con un calentamiento posterior del gránulo, el hinchamiento continúa mientras que la amilosa se difunde fuera del gránulo, hacia la

fase acuosa (Badui, 2006). Estos resultados coinciden con lo reportado por otros investigadores (Ahmed *et al.* 2018; Deka y Sit, 2016; Kittipongpatana *et al.*, 2011; Polesi *et al.*, 2011) quienes atribuyeron este comportamiento a la gelatinización parcial del almidón durante el autoclaveado, involucrando además la agregación, fusión o ruptura de los gránulos.

En los almidones lintnerizados, no se observaron diferencias notables en la estructura y apariencia del gránulo respecto al almidón nativo. Lawal (2004) no observó diferencias notables entre los almidones nativos y los modificados por lintnerización, oxidación y acetilación a partir de almidón nativo de malanga. Resultados similares han sido reportados para almidones de cebada (*H. sativum*, Jess) y maíz modificados químicamente, donde la integridad física del gránulo no se afectó por dichas modificaciones (Chávez-Murillo *et al.*, 2008) y en almidones oxidados (a diferentes concentraciones) a partir del almidón nativo de maíz de distintas variedades (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2019).

En lo que respecta al tamaño de gránulo promedio, el N-MAÍZ presentó un tamaño de 8 μm , el N-MAL de 1.5 μm y el N-MANZ de 5.2 μm . Los cuales son congruentes con lo reportado por Hernández-Medina *et al.* (2008) para almidón nativo de maíz (3-26 μm), por Aboubakar *et al.* (2008) para almidón nativo de malanga (< 5 μm) y Tirado-Gallegos *et al.* (2016) para almidón nativo de manzana (2-10 μm). El tamaño y forma de los gránulos de almidón depende principalmente de la variedad (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2018).

Se observó diferente morfología en el almidón nativo y lintnerizado de manzana en comparación con el nativo y lintnerizado de maíz. A diferencia del N-MAL y AR4-MAL, los cuales exhibieron forma similar a la fuente convencional (maíz). Con respecto al tamaño de gránulo, las fuentes no convencionales fueron diferentes al tamaño de la fuente convencional.

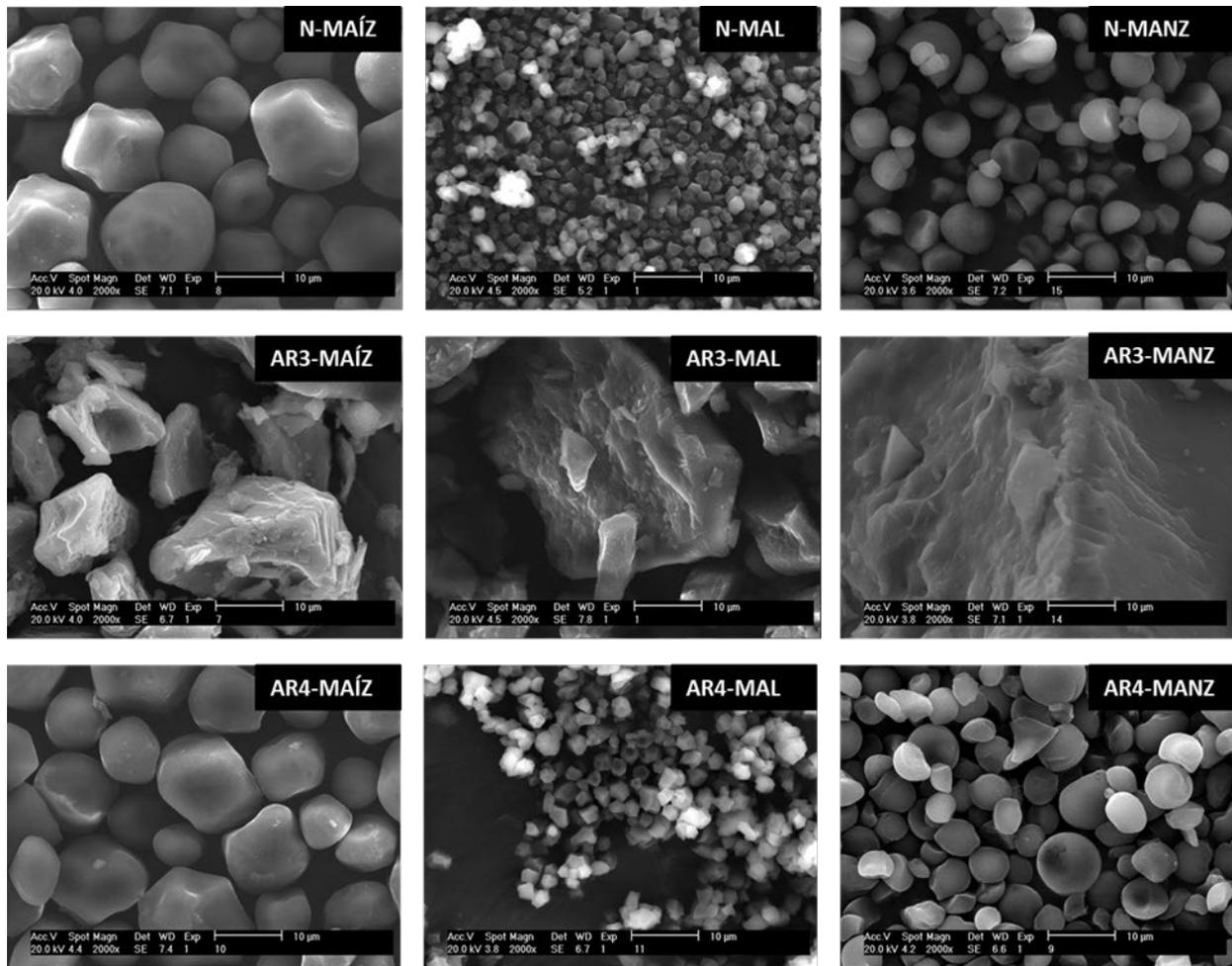


Figura 1. Microscopia electrónica de barrido de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.4. Propiedades Físicoquímicas

7.4.1. Contenido de Amilosa Aparente

El contenido de amilosa es una variable importante a considerar ya que determina algunas de las principales propiedades funcionales del almidón, como la formación de gel y retrogradación del almidón (Torruco-Uco *et al.*, 2016). Además de lo anterior, las propiedades físicas también

dependen de ello, así mismo, esta influye en las propiedades de textura de algunos productos alimenticios (Bustillos *et al.*, 2018), y está relacionada con la biosíntesis del almidón (Hoyos-Leyva *et al.*, 2017). Se ha demostrado que el contenido de amilosa tiene una correlación significativa con un mayor contenido de almidón resistente o una menor digestibilidad (Li *et al.*, 2019). El contenido de amilosa para almidón nativo de maíz, malanga y manzana fue de 28.6, 29.5 y 27.4% respectivamente (Cuadro 5).

En algunos estudios se han reportado menores contenidos de amilosa en almidón de maíz (22.5%) (Jane *et al.*, 1999) y en almidón de malanga (22.7%) (Lawal, 2004); mientras que para almidón de manzana se cuantificó un valor dentro del intervalo reportado por Stevenson *et al.* (2006) de 26-29.1%. Las diferencias encontradas pueden deberse a la variedad, el tiempo de cosecha y al lugar de cultivo (Simesek y El *et al.*, 2012). Por otro lado, en los almidones modificados (AR3 y AR4) el contenido de amilosa se vio disminuido ($P < 0.05$) debido a que se eliminan selectivamente las zonas amorfas durante dichas modificaciones. La disminución en el contenido de amilosa de los AR3 es congruente con lo reportado en almidón de malanga modificado por un proceso de convección con horno de aire caliente, donde dicha disminución fue atribuida a la unión de las cadenas de amilosa ya presentes entre sí o a la molécula de amilopectina (Deka y Sit, 2016). Lo contrario a este estudio ha sido reportado por Babu *et al.* (2014) en almidón de plátano autoclaveado, donde el contenido de amilosa incrementó después del procesamiento por autoclaveado, lo cual atribuyeron a una posible des-ramificación parcial de la amilopectina por el drástico calentamiento y presión de la autoclave.

El tratamiento con ácido disminuyó el contenido de amilosa por hidrólisis parcial. Los resultados del presente estudio son congruentes con lo reportado por Lawal (2004) en almidones de malanga lintnerizados y por Wang y Wang (2001) en almidones de papa, maíz y arroz, quienes reportaron una disminución en el contenido de amilosa durante el tratamiento con ácido, con respecto al almidón nativo. El ácido atacó principalmente las regiones amorfas dentro del gránulo de almidón y tanto la amilosa como la amilopectina se hidrolizaron simultáneamente con la presencia del ácido (Wang y Wang, 2001).

Entre los almidones autoclaveados y lintnerizados de maíz y manzana no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los tratamientos; contrario a lo contrario en los almidones modificados de malanga, en donde el menor contenido de amilosa se presentó en el AR4 (con diferencia significativa, $P < 0.05$).

Los almidones de las fuentes no convencionales estudiadas son diferentes a los almidones de la fuente convencional (maíz) en cuanto al contenido de amilosa, en su forma nativa y modificado. Es importante mencionar que los almidones de malanga (nativo, AR3 y AR4) presentaron porcentajes superiores de amilosa, comparando por tipo de modificación.

7.4.2. Determinación del Peso Molecular (PM)

El almidón es un polímero que consiste en una mezcla de macromoléculas de diferentes longitudes de cadena, con una estructura molecular muy similar, por lo que es difícil definir el PM con precisión (Cai *et al.*, 2019). El PM de los almidones nativos fue mayor al de los modificados, lo que indicó que las macromoléculas (amilosa y amilopectina) se rompieron debido a la degradación por los tratamientos (Cuadro 5).

Los AR3 de las tres fuentes botánicas mostraron una disminución significativa ($P < 0.05$) en el PM, con respecto a sus homólogos nativos, debido a que los almidones autoclaveados presentan un menor contenido de amilosa en comparación de sus nativos (Zeng *et al.*, 2015). Lo cual es congruente a lo reportado en almidón de semillas de loto autoclaveado, y ultrasonido-autoclaveado donde se observó una disminución en el PM en comparación con su almidón nativo y con almidón alto en amilosa de maíz (Zeng *et al.*, 2015).

Los almidones modificados por hidrólisis ácida presentaron una disminución significativa ($P < 0.05$) en el PM en comparación con los nativos, esto es atribuido a que las cadenas de amilosa son más susceptibles a la hidrólisis ácida que las cadenas de amilopectina. En el ataque inicial o temprano que se da en este tipo de modificación, la mayoría de las cadenas de amilosa pudieron

haberse hidrolizado en cadenas más cortas; mientras que las cadenas de amilopectina sufrieron el ataque ácido en menor grado (Xia *et al.*, 2017). Lo encontrado en estudio es similar a los reportados en almidón de cassava (tapioca) hidrolizado a diferentes tiempos, en almidones de arroz modificados por extrusión reactiva a través de esterificación con octenil-succinilación y acetilación, y en almidones de maíz hidrolizados; donde observaron una disminución en el PM, después de dichas modificaciones químicas (Cai *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2017; Ozturk *et al.*, 2011).

El peso molecular entre fuentes botánicas no convencionales y modificaciones resultaron diferentes a la fuente convencional, siendo los almidones de malanga (nativo, autoclaveado y lintnerizado) los que presentaron PM inferiores.

Cuadro 5. Determinación del porcentaje de amilosa y peso molecular de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.

Muestra	% Amilosa	Peso Molecular (1×10^3 kDa)
N-MAÍZ	28.62 ± 0.11^b	108.28 ± 0.92^a
AR3-MAÍZ	23.65 ± 0.10^f	86.39 ± 0.08^g
AR4-MAÍZ	23.55 ± 0.14^f	100.72 ± 0.12^b
N-MAL	29.48 ± 0.10^a	95.53 ± 0.14^d
AR3-MAL	24.82 ± 0.07^d	80.44 ± 0.15^h
AR4-MAL	24.18 ± 0.06^e	91.64 ± 0.09^f
N-MANZ	27.37 ± 0.08^c	98.23 ± 0.38^c
AR3-MANZ	22.88 ± 0.03^g	81.58 ± 0.09^h
AR4-MANZ	22.69 ± 0.06^g	93.59 ± 0.13^e

Media aritmética de al menos cinco repeticiones \pm error estándar. Valores con la misma letra, dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). La nomenclatura empleada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.5. Propiedades Funcionales

7.5.1. Índice de Solubilidad

El índice de solubilidad se muestra en la Figura 2. La solubilidad del almidón resulta en la lixiviación de la amilosa, que se disocia y difunde del gránulo de almidón durante la hinchazón (Ashwar *et al.*, 2016). Los valores de los almidones analizados cambiaron a partir de los 60 °C, presentaron una temperatura de gelatinización promedio entre 67 y 79 °C. La mayor solubilidad se observó a los 80 °C, para todos los almidones analizados, donde la mayoría de los gránulos ya se encuentran hinchados y gelatinizados. Las temperaturas más altas causaron la movilidad de las cadenas de almidón, aumentando la dispersión de las moléculas, las cuales mejoraron la solubilidad de los almidones (Kittipongpatana *et al.*, 2011; Lawal, 2005).

A 60 °C los almidones nativos tienen una solubilidad menor que los modificados. Entre 60 y 70 °C el N-MAÍZ, N-MAL y N-MANZ no presentan diferencias significativas entre ellos. A 80 °C el almidón N-MAL (0.22%) fue el más soluble, mientras que el N-MAÍZ (0.05%) presentó la solubilidad más baja, lo que se puede atribuir al tamaño de gránulo, ya que este influye en las propiedades funcionales, los gránulos más pequeños son más solubles que los de mayor tamaño (Singhal y Kulkarni, 1988). Lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio sobre el tamaño promedio de gránulo, donde el N-MAL mostró el menor tamaño (1.5 μm) y el N-MAÍZ el más grande (8 μm). Esto también se confirma con las microscopías en la Fig. 1.

Los almidones nativos y lintnerizados aumentaron la solubilidad conforme aumentó la temperatura. Los AR4 en general fueron más solubles con respecto a los AR3 y nativos. Lo que se debió a las amilosas de cadena corta producidas durante dicha modificación, las cuales se disocian y difunden fácilmente de los gránulos durante la hinchazón (Van Hung *et al.*, 2016), y al debilitamiento de la estructura interna de los gránulos de almidón y despolimerización de la amilosa (El Halal *et al.*, 2015). Así como, a la degradación de la zona amorfa producida por la hidrólisis ácida (Amaya-Llano *et al.*, 2011). Este aumento en la solubilidad de almidones lintnerizados, ha sido reportada

por Lawal (2004) en malanga, en arroz (Van Hung *et al.*, 2016), plátano (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015), en almidones de cebada oxidados (El Halal *et al.*, 2015) y en almidones de frijol rojo hidrolizado, donde la severidad de la hidrólisis aumentó la cantidad de carbohidratos solubles (Kerr *et al.*, 2000). Estos resultados se relacionan con el peso molecular de los almidones, Wang y Cui (2005) reportaron que a medida que el PM disminuye por efecto de la hidrólisis ácida, la solubilidad aumenta, lo cual es congruente con lo encontrado en los almidones lintnerizados del presente estudio en estas dos determinaciones.

En cuanto a los almidones autoclaveados, estos no mostraron un aumento notable en el índice de solubilidad con respecto a la temperatura, pero si con respecto a su contra parte nativa, a excepción del maíz, sin diferencia significativa ($P > 0.05$) entre el nativo y el AR3. Singh *et al.* (2009), informaron que la solubilidad está influenciada por las disposiciones estructurales de amilosa y amilopectina, el peso molecular y la longitud de cadena de almidón, los cuales pueden afectar la solubilidad.

El aumento en el índice de solubilidad de los almidones AR3-MAL y AR3-MANZ con respecto a su contra parte nativa, pudo deberse al tratamiento en autoclave, ya que, al calentar el almidón en exceso de agua, se rompe la estructura cristalina (debido a la ruptura de los puentes de hidrógeno causada por la energía cinética del tratamiento térmico) y posteriormente las moléculas de agua se unen por enlaces de hidrógeno a los grupos hidroxilo expuestos de la amilosa y la amilopectina, provocando así un aumento en la solubilidad de los gránulos (Hoover, 2001). Resultados similares se han determinado en almidones de arroz (Ashwar *et al.*, 2016). Por su parte, Dundar y Gocman (2013) reportaron un aumento de la solubilidad después del tratamiento por autoclave en almidones de maíz con mayor contenido de amilosa.

Se observó a 60 °C y 70 °C que el índice de solubilidad de los almidones N-MAL y N-MANZ fueron similares al N-MAÍZ, sin embargo, en los AR3 y los AR4 de malanga y manzana estos fueron diferentes a los almidones modificados de maíz. A 80 °C el almidón N-MAL y N-MANZ, se presentaron diferentes al N-MAÍZ, donde la solubilidad superior se observó en malanga y la menor solubilidad en el almidón nativo de maíz. En los almidones AR3 y AR4, manzana y malanga son diferentes a los almidones AR3 y AR4 de maíz.

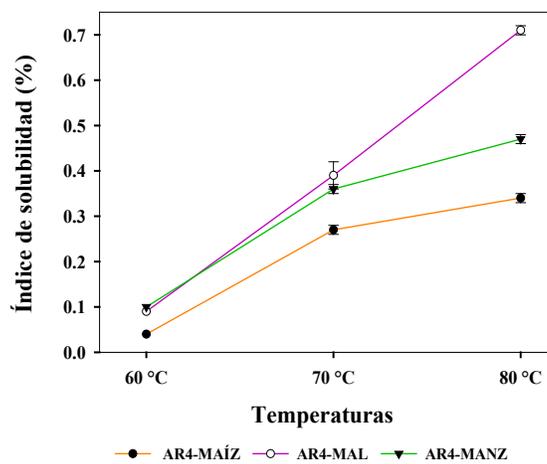
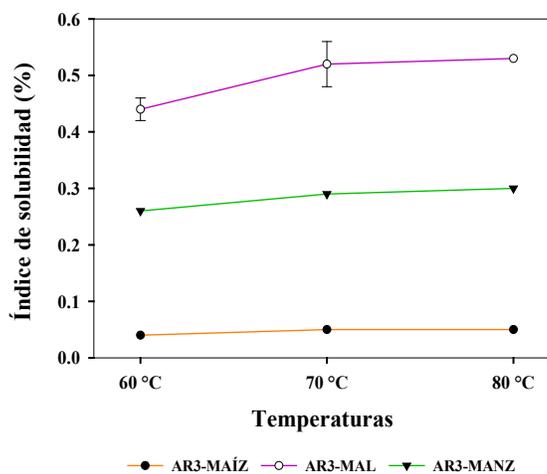
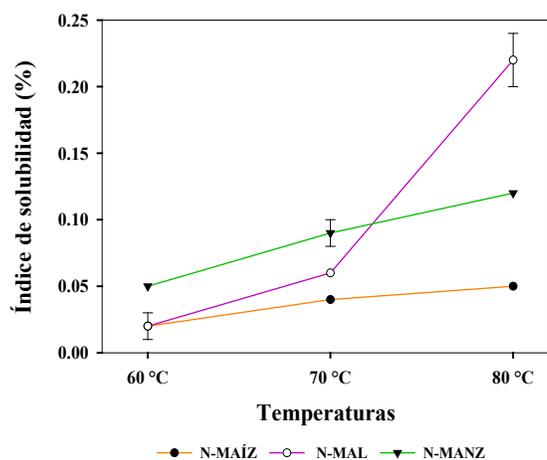


Figura 2. Índice de solubilidad de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.5.2. Índice de Absorción de Agua

El índice de absorción de agua (IAA) (Figura 3), es una medida indirecta de la capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón (Castanha *et al.*, 2018). A medida que aumentó la temperatura, también incrementó el IAA de N-MAÍZ, N-MAL, N-MANZ, AR4-MAÍZ y AR4-MANZ, debido a la ruptura de los puentes de hidrógeno intermoleculares de la zona amorfa, permitiendo así, una absorción de agua irreversible y progresiva (González-Soto *et al.*, 2008). Por otro lado, en los almidones AR3-MAL, AR3-MAÍZ, AR3-MANZ y AR4-MAL, presentaron una disminución del IAA a 70 °C, mientras que a los 80 °C aumentaron el IAA, sin embargo, aunque este aumento se presentó, el IAA, es menor que en los nativos. Estas diferencias en los almidones (AR3-MAÍZ, AR3-MAL, AR3-MANZ y AR4-MAL) se atribuyeron a un mayor contenido de AR, el cual afecta la capacidad del almidón para absorber agua (González-Soto *et al.*, 2007).

Se observó un IAA mayor a los 80 °C, donde el N-MANZ, presentó el valor de IAA estadísticamente más alto (18.59 g/g), a cualquiera de las otras muestras analizadas (este comportamiento también se reflejó en el poder de hinchamiento), seguido del N-MAL (12.07 g/g), y por último el AR4-MAL (4.21 g/g). En investigaciones recientes, se ha relacionado un mayor IAA en muestras con alto contenido de humedad (Hernández-Nava *et al.*, 2011), lo cual concuerda con lo encontrado en este estudio, ya que el N-MANZ y N-MAL, son las que mostraron mayor contenido de humedad (13.21 y 16.46%, respectivamente), y por tanto un IAA máximo. Con un alto contenido de humedad, la viscosidad sería baja, la cual permitiría una mezcla interna y un calentamiento uniforme, obteniendo una mejor gelatinización del almidón, lo cual puede conducir a una mayor absorción de agua (Lawton *et al.*, 1972).

A la temperatura de 80 °C, no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) en los almidones AR4-MANZ, N-MAÍZ, AR3-MAÍZ, AR3-MAL y AR4-MAÍZ, con valores que fluctuaron de 7.11 a 8.10 g/g. Los IAA más bajos, se observaron en el AR4-MAL y AR3-MANZ (4.21-5.89 g/g).

En los almidones autoclaveados y lintnenrizados a los 70 y 80 °C, los IAA fueron menores que los nativos, en todas las fuentes botánicas analizadas, un comportamiento que coincidió con el mayor

contenido de AR producido por los tratamientos (autoclaveado y lintnerización), el cual redujo la capacidad de absorción de agua del almidón (González-Soto *et al.*, 2007).

En el IAA, a 60 °C se observó similitud entre el AR4-MAL y AR4-MAÍZ, a diferencia de los demás almidones analizados. A 70 °C los almidones, nativos, AR3 y AR4 de manzana y malanga fueron similares a sus respectivos almidones de maíz. A 80 °C, AR3-MAL fue similar al AR3-MAÍZ y AR4-MANZ, también fue similar a AR4-MANZ.

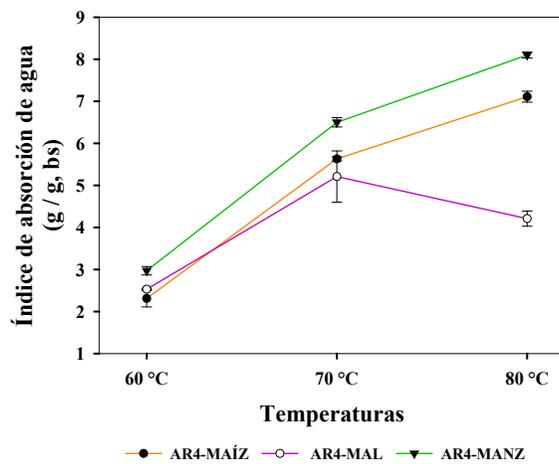
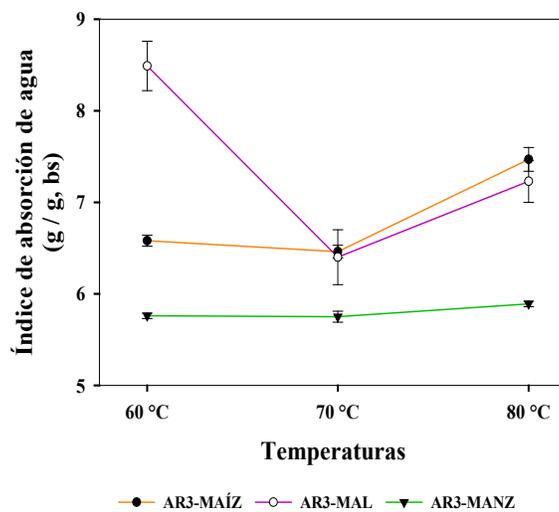
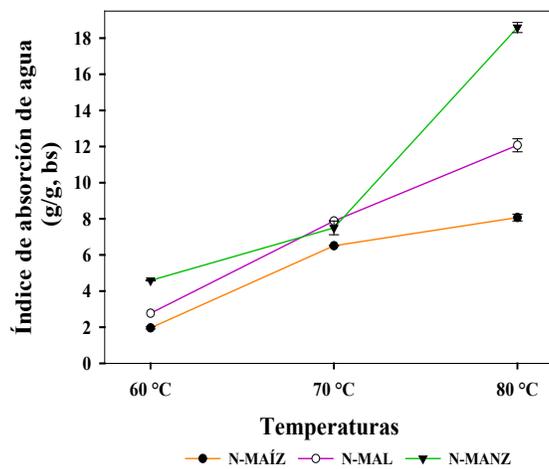


Figura 3. Índice de absorción de agua de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.5.3. Poder de Hinchamiento

La Figura 4, muestra el poder de hinchamiento de los almidones. En general, la hinchazón de todas las muestras comenzó a partir de los 60 °C y conforme la temperatura aumentaba el poder de hinchamiento también, a excepción del AR3-MAL. Este aumento sugiere, que la gelatinización ocurrió gradualmente. Los almidones nativos a 60 °C mostraron un poder de hinchamiento menor a los modificados. Sin embargo, la mayor hinchazón se observó a los 80 °C en el N-MANZ, con un poder de hinchamiento significativo, conforme al resto de los almidones ($P < 0.05$).

El aumento en la hinchazón de los gránulos de almidón puede incrementar el acceso de las enzimas digestivas a su estructura interna (Shin *et al.*, 2013). Tanto el AR4-MANZ, N-MAL, AR3-MAL y AR4-MAL a 80 °C, no mostraron diferencias significativas, en un rango de 14.3-15.4 g/g, los cuales son menores a los reportados para almidón nativo de papa (26-168 g/g) (Waterschoot *et al.*, 2014). Al incrementar la temperatura se produce una desorganización del almidón, por lo cual, más moléculas de agua podrían penetrar en los gránulos, aumentando los valores de hinchamiento (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015). Por otro lado, la hinchazón más baja se observó en los almidones N-MAÍZ, AR3-MANZ y AR3-MAÍZ a 80 °C (8.49, 8.47 y 7.90 g/g respectivamente).

El poder de hinchamiento de los AR3 de las tres fuentes botánicas a 60 °C fue mayor que sus respectivos almidones nativos. Sin embargo, a 80 °C el poder de hinchamiento disminuyó, aunque este cambio solo fue significativo en manzana. Lo que se explica considerando que, en el autoclaveado, la estructura granular se pierde, por lo cual solo se obtiene una adsorción parcial de agua, esto se confirmó con las microscopías electrónicas de barrido. Resultados similares fueron revelados por Aparicio-Saguilán *et al.* (2005), en almidones de plátano autoclaveados. Con respecto a los AR4, a 80 °C, los almidones de manzana y malanga mostraron una disminución en el poder de hinchamiento conforme a su contra parte nativa, lo observado en este estudio, ha sido reportado en almidones de arroz normales, cerosos y ricos en amilosa tratados con ácido y calor-humedad, donde los poderes de hinchamiento se redujeron significativamente, en comparación con los nativos (Van Huang *et al.*, 2016) y en almidones hidrolizados de maíz normales y cerosos, así como en cebada (Gao *et al.*, 2012). Estos resultados indican que esta propiedad funcional está

supeditada al tipo de modificación y la fuente botánica, ya que cada tipo de almidón se hincha de manera diferente, revelando diferencias en la organización molecular dentro de los gránulos (Deka y Sit, 2016).

En conclusión, a 60 °C los almidones nativos y modificados malanga y manzana se comportaron de manera diferente a los nativos y modificados de maíz. A 70 °C, se mostró similitud en N-MAL y N-MANZ con el N-MAÍZ, el AR3-MANZ fue similar al AR3-MAÍZ y AR4-MAL con AR4-MAÍZ. A 80 °C, el AR3-MANZ fue similar al AR3-MAÍZ.

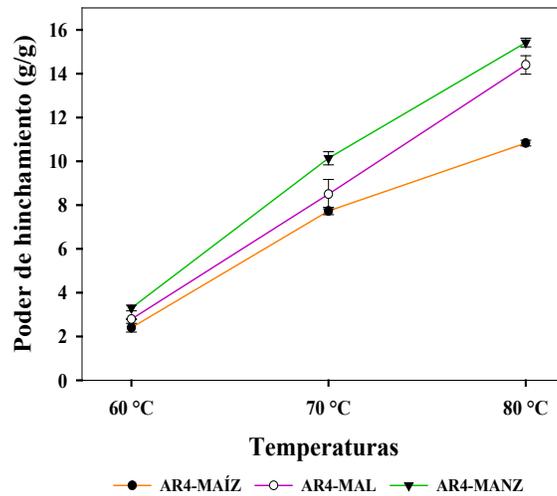
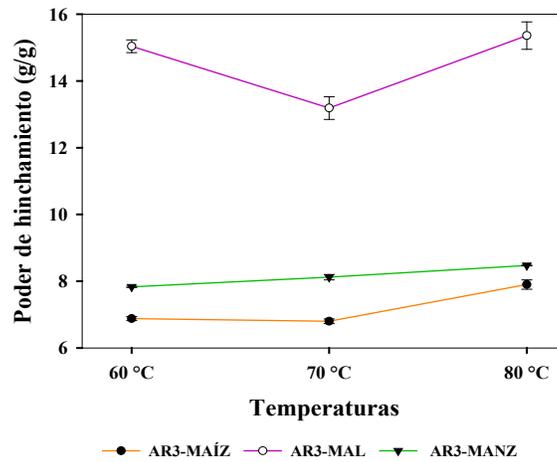
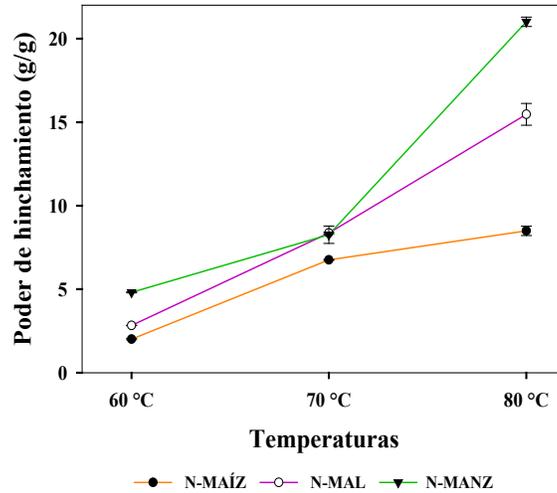


Figura 4. Poder de hinchamiento de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.6. Determinaciones Enzimáticas

7.6.1. Almidón Total (AT)

El contenido de AT es determinado como la pureza (Cuadro 6) es un indicativo de calidad. Para los almidones nativos de maíz (98.21%), malanga (91.13%) y manzana (93.56%) fue similar a lo reportado en diversos estudios. Bello-Pérez et al. (2001) determinaron valores de AT de 98.5% para maíz; para malanga de 92.9% (Rincón-Aguirre *et al.*, 2017), mientras que, para manzana, se han reportado valores de 92-94.4% (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016).

En cuanto a las diferencias entre tipo de modificación y por fuente botánica, el AT en los almidones nativos, AR3 y AR4 de la fuente convencional fue superior y por tanto diferente al de las fuentes no convencionales.

7.6.2. Almidón Disponible (AD)

El contenido de AD en los almidones nativos (Cuadro 6) (95.15% N-MAÍZ; 90.31% N-MANZ y 85.27% N-MAL) fue mayor que en los modificados ($P < 0.05$). En la literatura científica son escasos los estudios que se han realizado en cuanto a esta determinación. Sin embargo, Bello-Pérez *et al.* (2006) realizaron un estudio donde evaluaron el contenido de almidón disponible a diferentes tiempos de almacenamiento en distintos tipos de tortillas de maíz el cual osciló entre 59.7 a 74.5%. González-Soto *et al.* (2004) reportaron un AD en almidón de plátano de 80.5%. En el presente estudio disminuyó el AD en los AR3 y AR4, y fue mayor el contenido de AD en los almidones lintnerizados que aquellos autoclaveados (estadísticamente significativo $P < 0.05$), debido que las modificaciones producen una re-asociación de las moléculas de almidón las cuales pueden retrasar o impedir la hidrólisis por las enzimas digestivas. Esto fue similar a lo reportado por Bello-Pérez *et al.* (2006) en tortillas recién preparadas elaboradas a partir de masa de diferentes procedimientos

y por González-Soto *et al.* (2004) en almidón de plátano des-ramificado con la enzima pululanasa a diferentes tiempos (desde 1 h hasta 22 h), donde el contenido de AD disminuyó conforme aumentó el tiempo de des-ramificación de 77.5 a 70%. Es decir, cuando aumentó el contenido de AR, el AD disminuyó.

En los almidones nativos, la fuente convencional (maíz) mostró contenidos de AD superiores a los almidones de las fuentes no convencionales. En los AR3, la manzana fue similar al AR3 de la fuente convencional, y en los AR4, el maíz fue superior y diferente a las fuentes no convencionales.

7.6.3. Almidón Resistente (AR)

El AR es un componente determinante para las características de un alimento funcional (Hedayati y Niakousari, 2018) y se define como la suma de almidón y productos de la degradación del almidón no absorbido en el intestino delgado de individuos sanos (Nender-Suárez *et al.*, 2018). El contenido de AR (Cuadro 6) en los almidones nativos fueron menores al 5%. El almidón nativo de malanga mostró la mayor cantidad de AR (3.24%), seguido del almidón nativo de manzana (2.17%) y posteriormente el almidón nativo de maíz (1.98%), estos dos últimos sin presentar diferencia estadística ($P > 0.05$). Siendo los almidones de malanga (nativo y modificados), los que mostraron mayor cantidad de AR.

El AR aumentó con la modificación física (en almidón de maíz de 1.98 a 8%, malanga de 3.24 a 12.51% y manzana de 2.17 a 7.28%) y química (en almidón de maíz de 1.98 a 5.69%, malanga de 3.24 a 9.27% y manzana de 2.17 a 4.85%) siendo estadísticamente significativo ($P < 0.05$), respecto a sus contrapartes nativas. Hallazgos similares han sido publicados en almidones de plátano modificados en autoclave de 1.51 a 16.02% (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005), en almidones de maíz autoclaveados de 0.68 a 8.47% (Nender-Suárez *et al.*, 2018), en trigo autoclaveado de 0.3 a 4.8% (Berry, 1986). Este incremento, en los AR3, se puede atribuir a los ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento en autoclave, los cuales resultaron en una combinación de un proceso de gelatinización, que interrumpe la estructura granular al calentar una dispersión de almidón en

exceso de agua, y a la retrogradación (produce una recristalización de los componentes del almidón) al enfriar, resultando en una producción mayor de AR3 (Babu *et al.*, 2014).

Igualmente, en la modificación química aumentaron estos valores, ya que se produjo una despolimerización de las cadenas de amilosa y ramificaciones de amilopectina; sin embargo, la lintnerización no degrada por completo la estructura cristalina (Franco *et al.*, 2002), lo cual puede producir un almidón resistente a la hidrólisis enzimática (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). Resultados similares fueron publicados por Nender-Suárez *et al.* (2018) de 0.68 a 2.10% en almidón de maíz sometido a hidrólisis ácida y en plátano lintnerizado de 1.51 a 2.61% (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005). Por lo cual se concluye que estas fuentes no convencionales son aptas para la obtención de almidón resistente y los procedimientos utilizados para la preparación de AR a partir de las fuentes no convencionales, generó almidones con cantidades similares y en algunos casos mayores que los reportados en los almidones antes mencionados. Sin embargo, con el tratamiento de autoclave, se obtuvo mayor cantidad de almidón resistente (estadísticamente significativo $P < 0.05$) que, con la hidrólisis ácida, lo que concuerda con el estudio de Nender-Suárez *et al.* (2018), donde obtuvieron mayor cantidad de AR por medio del tratamiento en autoclave que por el método de lintnerización.

El contenido de amilosa es importante para la producción de AR, ya que los almidones con un alto contenido poseen mayor capacidad para la formación de AR (Bello-Pérez *et al.*, 2006), lo cual fue consistente con lo encontrado en el presente estudio.

Entre los almidones nativos el contenido de AR en la manzana fue similar al N-MAÍZ. En los AR3 y AR4 la malanga y la manzana fueron diferentes a los almidones modificados de maíz. Los almidones de malanga se mostraron superiores en el contenido de AR, tanto en el almidón nativo como en AR3 y AR4.

7.6.4. Almidón Resistente Retrogradado (ARr)

El contenido de ARr en todas las muestras de almidón fue menor al 2% (Cuadro 6). En los AR4 se obtuvieron cantidades mayores de ARr que en los nativos ($P < 0.05$); sin embargo, la cuantificación de ARr en las muestras de AR3-MAL y AR3-MAÍZ indicó mayores cantidades ($P < 0.05$) de ARr en comparación con sus homólogos nativos y lintnerizados. Esto puede deberse a que, durante la retrogradación del almidón, las cadenas amilosa y las fracciones lineales de la amilopectina se reorganizan en estructuras de mayor complejidad que son difíciles de digerir por las enzimas digestivas (Bello-Pérez *et al.*, 2006). Recientemente, este fenómeno también se ha relacionado con el almacenamiento y tiempo de enfriamiento lo cual sucede principalmente en el tratamiento por autoclave (Hidayat *et al.*, 2018).

Lo anterior plantea la necesidad de realizar estudios estructurales de mayor alcance o profundidad, ya que en nuestro estudio observamos que el contenido de ARr en la muestra AR4-MANZ fue mayor en comparación con el tratamiento por autoclaveado (AR3-MANZ). Esto supondría que existen fenómenos subyacentes al proceso de retrogradación que podrían estar implicados como son el nivel de organización de las estructuras de las dobles hélices de la amilopectina y su configuración en estructuras de empaquetamientos diferentes, más que la cantidad de amilosa presente en los gránulos de almidón de acuerdo a su origen botánico. Independientemente de esto, la literatura científica al respecto es escasa o limitada, por lo cual se sugiere la realización de estudios adicionales en torno a estos fenómenos subyacentes.

Las propiedades funcionales se vieron afectadas por el contenido de AR y ARr, al presentar mayor cantidad de AR y ARr, el índice de absorción de agua y el poder de hinchamiento disminuyeron.

Los almidones nativos de las fuentes no convencionales fueron diferentes al de la fuente convencional, donde el N-MAL fue superior. Entre los AR3, no se mostraron similitudes entre los almidones, sin embargo, el AR3-MAL fue el que presentó mayor contenido de ARr. En los AR4, la manzana presentó similitud con la fuente convencional, a diferencia de la malanga la cual fue superior.

Cuadro 6. Determinaciones enzimáticas (%) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.

Muestra	AT	AD	AR	ARr
N-MAÍZ	98.21 ± 0.26 ^a	95.15 ± 0.25 ^a	1.98 ± 0.03 ^h	0.80 ± 0.01 ^c
AR3-MAÍZ	93.86 ± 0.32 ^b	84.37 ± 0.12 ^c	8.00 ± 0.05 ^c	1.10 ± 0.02 ^b
AR4-MAÍZ	93.01 ± 0.09 ^{bc}	86.13 ± 0.04 ^c	5.69 ± 0.12 ^c	1.01 ± 0.01 ^c
N-MAL	91.13 ± 0.12 ^d	85.27 ± 0.05 ^d	3.24 ± 0.04 ^g	0.92 ± 0.01 ^d
AR3-MAL	89.33 ± 0.25 ^e	75.29 ± 0.11 ^g	12.51 ± 0.12 ^a	1.18 ± 0.01 ^a
AR4-MAL	88.04 ± 0.13 ^f	77.28 ± 0.07 ^f	9.27 ± 0.06 ^b	1.11 ± 0.01 ^b
N-MANZ	93.56 ± 0.28 ^b	90.31 ± 0.15 ^b	2.17 ± 0.04 ^h	0.71 ± 0.01 ^f
AR3-MANZ	92.36 ± 0.22 ^c	84.07 ± 0.04 ^e	7.28 ± 0.05 ^d	0.91 ± 0.01 ^d
AR4-MANZ	90.96 ± 0.06 ^d	84.94 ± 0.04 ^d	4.85 ± 0.03 ^f	1.06 ± 0.01 ^{bc}

Valores que no comparten una letra dentro de la misma columna son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.7. Análisis de Perfil de Textura (TPA)

El TPA (Cuadro 7) fue diseñado para emular la experiencia de masticación sensorial. Por lo que en dicho cuadro se muestran los valores de dureza, cohesividad, gomosidad, elasticidad, masticabilidad y adhesividad de los almidones.

El almidón N-MANZ presentó la mayor dureza (fuerza requerida para causar la deformación en una muestra, Da Rosa *et al.*, 2012), seguido del N-MAÍZ (4.12; 2.91N respectivamente), los cuales fueron significativos al resto de los almidones ($P < 0.05$). Este comportamiento se atribuye a la longitud de la cadena de amilosa (Mehboob *et al.*, 2015), a un contenido alto de amilosa y a cadenas largas de amilopectina (Mua y Jackson, 1997) a los almidones con geles más duros. Los geles autoclaveados y lintnerizados presentaron una disminución significativa en la dureza, con respecto a los almidones nativos, esto podría deberse a una disminución en la longitud de la cadena de

amilosa, lo que concuerda con Chandla y Singh (2017) y Menhboob *et al.* (2015). Estos resultados son relacionan con el contenido de amilosa, el cual fue mayor para los almidones con geles más duros y conforme se aplicaron los tratamientos a los almidones, la amilosa y la dureza disminuyeron. Así como también, con el peso molecular de los almidones, el cual disminuyó conforme se les aplicó tratamiento de autoclaveado o la lintnerización.

Los almidones que presentaron mayor cohesividad (capacidad del gel para resistir deformaciones) fueron el AR3-MANZ (0.99) y AR3-MAÍZ (0.99) ($P < 0.05$). La lixiviación de la amilosa de los gránulos y su reasociación juegan un papel principal en la formación de un gel cohesivo (Hedayati y Niakousari, 2018). El almidón N-MANZ fue el de menor cohesividad (0.38). Entre los almidones N-MAÍZ, AR4-MAÍZ y AR4-MAL no se determinaron diferencias significativas ($P < 0.05$).

La gomosidad es la energía requerida para desintegrar un gel y la masticabilidad imita la cantidad de energía requerida para triturar un material semisólido (Chandla y Singh, 2017 y Menhboob *et al.*, 2015). La gomosidad y masticabilidad disminuyeron en los almidones AR3 y AR4 con respecto a su contra parte nativa, por lo cual se deduce que estos parámetros son afectados por dichas modificaciones. Resultados similares fueron encontrados en fideos hechos de almidón de amaranto, con tratamientos de calor-humedad (Chandla y Singh, 2017) y en almidones de trigo y maíz modificados químicamente (Hedayati y Niakousari, 2018). En estos estudios se observó que la tendencia en gomosidad y masticabilidad fue similar a lo encontrado en la dureza, lo cual puede deberse a esta variable (dureza) en el cálculo de la gomosidad y masticabilidad. De acuerdo con el análisis de perfil de textura, al grado de recuperación de la deformación se le denomina elasticidad (Menhboob *et al.*, 2015). Los almidones nativos y modificados de maíz mostraron la mayor elasticidad ($P < 0.05$) y la muestra con menor elasticidad fue la del almidón N-MANZ, con respecto al resto de los almidones. La muestra N-MANZ mostró mayor adhesividad (trabajo necesario para superar las fuerzas atractivas entre la superficie de un alimento y la superficie de otro material con el que el alimento entra en contacto) (-3.57), la cual fue significativa ($P < 0.05$) con respecto a los almidones nativos y modificados de las tres fuentes botánicas estudiadas. Mientras que las muestras de menor adhesividad fueron el AR3-MANZ, AR4-MAL, AR3-MAÍZ y AR4-MAÍZ. De acuerdo con estos resultados, los AR4 y AR3 podrían ser adecuados para postres como pudines y natillas, donde son deseables la formación de un gel débil, alta capacidad de unión al agua y una textura de

menor gomosidad. En general, los geles (de almidones) de menor dureza, menor masticabilidad y gomosidad pueden tener este tipo de aplicaciones como aditivos en postres (Menhboob *et al.*, 2015).

Se concluyó en dureza, que los almidones nativos y AR4 de las fuentes no convencionales son diferentes a la fuente convencional y los AR3 similares. En cohesividad, mostraron similitud en N-MAL, AR3-MANZ, AR4-MAL y AR4-MANZ con sus respectivos almidones de la fuente convencional (maíz). En gomosidad, los almidones N-MANZ, AR3-MAL, AR3-MANZ y AR4-MAL fueron similares a los del maíz. En masticabilidad, no se encontraron similitudes entre los almidones nativos de malanga y manzana con el maíz, pero sí en los almidones AR3 y AR4 de malanga y manzana con los almidones AR3 y AR4 de maíz. No se mostraron similitudes en los almidones nativos, autoclaveados y lintnerizados de malanga y manzana con los almidones nativos y modificados de maíz en el parámetro de elasticidad. En adhesividad N-MAL fue similar al N-MAÍZ, el AR3-MANZ mostró similitud con el AR3-MAÍZ y el AR4-MAL fue similar al AR4-MAÍZ.

Cuadro 7. Análisis de perfil de textura de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana.

Muestra	Dureza (N)	Cohesividad	Gomosidad (N)	Elasticidad (cm)	Masticabilidad (N × s)	Adhesividad (N × s)
N-MAÍZ	2.9 ± 0.03 ^b	0.64 ± 0.03 ^{bc}	1.89 ± 0.07 ^a	2.51 ± 0.05 ^a	4.43 ± 0.03 ^a	-1.03 ± 0.01 ^b
AR3-MAÍZ	0.07 ± 0.01 ^f	0.99 ± 0.004 ^a	0.06 ± 0.00 ^e	2.65 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.01 ^d	-0.33 ± 0.27 ^c
AR4-MAÍZ	0.36 ± 0.00 ^{de}	0.61 ± 0.04 ^{bc}	0.26 ± 0.02 ^{cd}	2.59 ± 0.02 ^a	0.70 ± 0.08 ^{cd}	-0.35 ± 0.04 ^c
N-MAL	0.48 ± 0.06 ^d	0.71 ± 0.03 ^b	0.34 ± 0.01 ^{bc}	1.97 ± 0.04 ^d	0.68 ± 0.01 ^{cd}	-1.29 ± 0.11 ^b
AR3-MAL	0.18 ± 0.01 ^{ef}	0.72 ± 0.1 ^b	0.13 ± 0.01 ^{de}	2.17 ± 0.001 ^{bc}	0.29 ± 0.01 ^d	-1.13 ± 0.02 ^b
AR4-MAL	0.14 ± 0.00 ^f	0.67 ± 0.01 ^{bc}	0.09 ± 0.01 ^{de}	2.30 ± 0.02 ^b	0.21 ± 0.01 ^d	-0.29 ± 0.00 ^c
N-MANZ	4.12 ± 0.08 ^a	0.38 ± 0.02 ^d	1.74 ± 0.03 ^a	1.61 ± 0.06 ^c	2.29 ± 0.35 ^b	-3.57 ± 0.01 ^a
AR3-MANZ	0.13 ± 0.01 ^f	0.99 ± 0.01 ^a	0.13 ± 0.01 ^{de}	2.09 ± 0.00 ^{cd}	0.27 ± 0.01 ^d	-0.24 ± 0.04 ^c
AR4-MANZ	0.81 ± 0.01 ^c	0.57 ± 0.01 ^c	0.44 ± 0.01 ^b	1.97 ± 0.02 ^{cd}	1 ± 0.09 ^c	-1.28 ± 0.01 ^b

Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Valores que no comparte una letra dentro de las columnas son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P < 0.05$). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.8. Análisis Térmico

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés), proporciona mediciones cuantitativas del flujo de calor asociado con la gelatinización, en el que los picos endotérmicos son indicativos de fusión. Las temperaturas de transición del almidón y las entalpías de gelatinización por DSC (Cuadro 8) se pueden relacionar con las características del gránulo, como la cristalinidad, sin embargo, esta relación no se encontró en el presente estudio, esto pudo estar influenciado por la estructura molecular de la amilopectina de los almidones (Fujita *et al.*, 1998; Noda *et al.*, 1996), por lo tanto, se recomienda realizar en posteriores estudios, dicha evaluación.

La temperatura de inicio (T_i) de los almidones nativos de maíz, malanga y manzana oscilo entre 62.73 y 72.3 °C, y de los almidones lintnerizados de 63.81 a 72.12 °C, las cuales fueron similares. La temperatura de inicio representa el principio del período de gelatinización y está relacionada con el hinchamiento del gránulo. Si la T_i es baja para la formación de gel, el almidón empieza a gelatinizar en menos tiempo, esto es favorable para la industria ya que involucra menos energía y tiempos propicios, las cuales disminuyen los costos de sus procesos en cuanto a energía y tiempo (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2018).

Las temperaturas de transición de N-MAÍZ encontradas en esta investigación fueron similares a las reportadas por Bustillos-Rodríguez *et al.* (2018), con valores de $T_i = 67.5$; $T_p = 72.2$ y $T_f = 80.9$ °C en almidón de maíz blanco. En cuanto al N-MAL en este estudio fueron $T_i = 72.3$; $T_p = 79.32$; $T_f = 85.35$ °C, estas son menores a las obtenidas por Hoyos-Leyva *et al.* (2018) ($T_i = 78$; $T_p = 83.1$; $T_f = 90.8$ °C) en almidón de malanga. Mientras que, para almidón de manzana Stevenson *et al.* (2006) mostraron temperaturas de transición mayores ($T_i = 64.7$; $T_p = 70$; $T_f = 76.2$ °C) a las encontradas en este estudio ($T_i = 62.73$; $T_p = 67.07$; $T_f = 73.53$ °C). Las diferencias en los rangos de temperatura entre los almidones de la misma fuente botánica pueden deberse a las variedades, y métodos de extracción del almidón (Kittipongpatana *et al.*, 2011).

Las temperaturas de transición del almidón de malanga no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los nativos y los AR4; en el maíz solo se observa diferencia significativa en la T_p .

Con respecto al almidón de manzana, las temperaturas de transición fueron mayores en los AR4, en comparación con su contra parte nativa, lo cual es significativo ($P < 0.05$). Durante la lintnerización, los cristales se desacoplan y ya no se desestabilizan por las zonas amorfas y, por lo tanto, los cristalitos hidrolizados se funden a temperaturas más altas (Amaya-Llano *et al.*, 2011). Lo sucedido con la manzana, ha sido informado en almidones de jícama, maíz, maíz ceroso, trigo, papa y camote (*Ipomoea batatas*) lintnerizados (Amaya-Llano *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2005b; Jenkins y Donald 1997).

Las entalpías de gelatinización de maíz y malanga mostraron una disminución durante la lintnerización, en comparación con sus homólogos de almidón nativo, aunque esta disminución solo fue significativa en malanga. Esta reducción en la entalpia se produce debido a la pérdida de orden de las regiones amorfas previo a la gelatinización (Amaya-Llano *et al.*, 2011), por otro lado, en la manzana la entalpía incrementó (significativamente), en comparación con su contraparte nativa. Este incremento reflejó la energía necesaria para fundir las hélices dobles de la amilopectina, y las dobles hélices formadas entre amilosa-amilosa y amilosa-amilopectina, durante la lintnerización (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2015).

Para que el almidón gelatinice, este debe hidratarse. En los AR3 no se presentó la temperatura de gelatinización y por ende no se observaron las temperaturas de transición térmica, debido a que el autoclaveado promovió un reordenamiento molecular, por lo cual, la hidratación se vio afectada; esto supone que no puede haber un fenómeno de gelatinización como el que sucede en los almidones nativos. Por lo tanto, los AR3 analizados no atraparon agua, por lo que la gelatinización no se llevó a cabo, presentado, una fusión de cristales, Noda *et al.* (1998) fundamentan que la temperatura de gelatinización está influenciada por la estructura molecular de la región cristalina, la que se debe a la distribución de las cadenas cortas de amilopectina y no a la proporción de regiones cristalinas, la cual corresponde al radio de la amilosa y la amilopectina. Estos resultados concuerdan con lo encontrado en el poder de hinchamiento, el cual disminuyó y solo se presentó una adsorción parcial del agua, así como también con el índice de absorción de agua, donde en dicho índice se mostró una disminución y en las MEBs donde se observó que no están fusionados de forma laminar.

En las temperaturas de transición, los almidones nativos y lintnerizados de malanga y manzana son diferentes a los almidones de maíz. El almidón N-MAL y AR4-MAL presentaron las temperaturas de transición más altas. En cuanto a la entalpía, el N-MAL es similar a N-MAÍZ, mientras que la manzana es diferente. El N-MANZ mostró la entalpía menor. En AR4-MAL y AR4-MANZ, las entalpías son similares al AR4-MAÍZ.

Cuadro 8. Temperaturas de transición (T_i = temperatura de inicio; T_p = temperatura de pico; T_f = temperatura final) y entalpía de gelatinización (ΔH) de almidones nativos y modificados de maíz, manzana y malanga.

Muestra	T_i (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔH (J/g)
N-MAÍZ	68.82 ± 0.20^b	73.52 ± 0.12^b	78.91 ± 0.21^b	10.24 ± 0.53^{ab}
AR3-MAÍZ	Np	Np	Np	Np
AR4-MAÍZ	68.33 ± 0.16^b	72.78 ± 0.10^c	79.21 ± 0.42^b	9.41 ± 0.34^{bc}
N-MAL	72.30 ± 0.13^a	79.32 ± 0.17^a	85.35 ± 0.27^a	11.50 ± 0.44^a
AR3-MAL	Np	Np	Np	Np
AR4-MAL	72.12 ± 0.36^a	79.62 ± 0.10^a	85.58 ± 0.13^a	7.74 ± 0.35^{cd}
N-MANZ	62.73 ± 0.05^d	67.08 ± 0.09^e	73.53 ± 0.47^d	7.16 ± 0.55^d
AR3-MANZ	Np	Np	Np	Np
AR4-MANZ	63.82 ± 0.21^c	68.65 ± 0.15^d	76.66 ± 0.49^c	9.76 ± 0.33^{abc}

Media aritmética de al menos tres repeticiones \pm error estándar. Valores con la misma letra, dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). Np = No presentó. La nomenclatura empleada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.9. Análisis Estructurales (Difracción De Rayos X) y % de Cristalinidad

En la Figura 5 se muestra el patrón de difracción de rayos X, donde el almidón nativo de maíz exhibió un patrón de tipo A, característico de los cereales, con picos en $2\theta = 15, 17, 17.8$ y 22.8° . Lo encontrado en este estudio coincide con lo reportado para almidón nativo de maíz por Dhital *et al.* (2011) y Xie *et al.* (2006). Este mismo patrón se ha observado en amaranto (Hoover *et al.*, 1998)

y arroz (Ashwar *et al.*, 2017). Por su parte, el almidón nativo de malanga presentó picos en los ángulos 14.9° , 17° , 17.9° , 22.9° (2θ), lo que indica que su estructura es de tipo A. Este tipo de patrón (tipo A) fue reportado en almidón nativo de malanga de las variedades *X. sagittifolium* (Lawal, 2004) y de la variedad *C. esculenta* (Torres *et al.*, 2015). El patrón de difracción es determinado por la longitud y distribución de amilopectina. La cristalinidad de los gránulos de almidón tipo A son formadas por cadenas cortas de amilopectina (Hoyos-Leyva *et al.*, 2017).

El almidón nativo de manzana, mostró tres picos predominantes ($2\theta = 15^\circ$, 17° , 18° y 23°), los cuales son característicos del tipo B. Estos resultados difieren de los reportados por Stevenson *et al.* (2006), quienes observaron un patrón de cristalinidad tipo C en almidones de manzana de distintos cultivares (Gala, Golden Delicious, Granny Smith, Jersey mac, Jonagold y Royal Gala). Tirado-Gallegos *et al.* (2016), reportaron este mismo patrón (tipo C), para la variedad "Golden Delicious Smoothee" con picos definidos en $2\theta = 15^\circ$, 18° , 23° y 19° . Las diferencias encontradas se pueden atribuir al cultivar y a las condiciones agroclimáticas de la región de cultivo (Kilili *et al.*, 1996). En el caso de los AR3, todas las fuentes botánicas analizadas, mostraron fusión de picos y pérdida significativa de difracción, siendo más evidente en el AR3 de malanga, seguido de manzana y posteriormente el de maíz, lo que indica que las estructuras cristalinas de los almidones se destruyeron durante el autoclaveado. Comportamientos similares fueron reportados por Kittipongpatana *et al.* (2011) en almidón de cotiledón de Jaca (*A. heterophyllus* Lam.) pregelatinizado. Mientras que, en los AR4 no se observan diferencias entre esta modificación y su contra parte nativa, esto fue similar a lo encontrado en almidón de arroz (Ashwar *et al.*, 2017), en almidón de plátano lintnerizado (Rivas-González *et al.*, 2008) y almidón de malanga lintnerizado (Lawal, 2004); lo cual se atribuye, a que, la lintnerización se produjo principalmente en las zonas amorfas de los gránulos, por lo cual la estructura cristalina no se ve afectada (Kittipongpatana *et al.*, 2011; Rivas-González *et al.*, 2008). Estos resultados concuerdan con las microscopías electrónicas de barrido, donde no se reflejaron diferencias en la estructura y forma del gránulo entre los almidones nativos y los lintnerizados, a diferencia, de los almidones autoclaveados, los cuales perdieron su integridad física.

El N-MAL presentó el mismo patrón de difracción de rayos X que el N-MAÍZ. El N-MANZ mostró un patrón diferente. Este mismo comportamiento se observó en los AR4. En los almidones AR3,

las fuentes no convencionales mostraron un comportamiento similar al AR3 de la fuente convencional.

Los porcentajes de cristalinidad de los almidones analizados se muestran en el Cuadro 9. En los almidones nativos, el porcentaje de cristalinidad mayor fue para maíz (38.03%), seguido de malanga (30.13%) y posteriormente de la manzana (29.9%), estos dos últimos sin diferencias significativas entre ellos ($P > 0.05$).

En cuanto a los AR3, la cristalinidad disminuyó significativamente ($P < 0.05$) con respecto a sus almidones nativos (maíz 26.63%, malanga 23.33% y manzana 23.39%), atribuido al autoclaveado el cual causó una desorganización, interrupción o ruptura de la estructura cristalina de los gránulos por el efecto de la presión y el tratamiento hidrotérmico (Deka y Sit, 2016). Los valores de cristalinidad obtenidos en los almidones autoclaveados están acorde con las intensidades máximas obtenidas en la presente investigación, ya que en los difractogramas de rayos X se observó una pérdida de la intensidad en los picos, lo cual sugiere una pérdida de la matriz cristalina debido a la ruptura de los puentes de hidrógeno, que causa el desplazamiento de las doble hélice adyacente y pérdida de la cristalinidad (Deka y Sit, 2016).

Con respecto a los AR4, el porcentaje mayor de cristalinidad lo presentó el maíz (31.05%), después la malanga (30.32%) entre estos dos no se observó diferencia significativa; ($P > 0.05$) y por último la manzana (27.39%). La cristalinidad del AR4-MAL fue similar a la de su homólogo nativo; mientras que, AR4-MAÍZ y AR4-MANZ exhibieron una disminución significativa ($P < 0.05$) en dicho porcentaje con respecto a su almidón nativo. La hidrólisis de las zonas amorfas permite la reorganización de los segmentos de las cadenas y la formación de una estructura de mayor cristalinidad (Biliaderis *et al.*, 1980). La cristalinidad del AR4 de maíz y manzana resultó menor que la de sus respectivos almidones nativos debido a la lintnerización, lo que indicó un debilitamiento de las estructuras internas como consecuencia del ataque del ácido (Amaya-Llano *et al.*, 2011). Se ha demostrado que el contenido de amilopectina y la longitud de sus cadenas se encuentran entre los elementos que influyen en el grado de hidrólisis y las regiones amorfas en distintos tipos de almidones y podrían ser diferentes en dimensión y arreglo molecular (Amaya-Llano *et al.*, 2011), con esto se podría explicar la ausencia de diferencias en el porcentaje de

cristalinidad del almidón de malanga respecto a su almidón nativo; sin embargo, se sugieren estudios adicionales a mayor nivel o profundidad serían recomendables realizar para discernir estos comportamientos.

La cristalinidad relativa de los almidones se ha relacionado con el contenido de amilosa en los almidones, es así que a un menor contenido de amilosa existe una cristalinidad relativa mayor en los almidones (Amaya-Llano *et al.*, 2011), sin embargo en el presente estudio, este comportamiento no se reflejó así, esto pudo deberse al tamaño y cantidad de cristalitas (influenciados por el contenido y longitud de la cadena de amilopectina), la cantidad de hélices dobles que se organizan en la matriz cristalina y el grado de interacción entre las hélices dobles (Shi y Gao, 2016; Jayakody y Hoover, 2002).

Se encontró una correlación positiva entre el porcentaje de cristalinidad y la gomosidad en el N-MAÍZ, N-MANZ y AR4-MANZ ($r = 1.000$, $P < 0.05$), lo cual se atribuye a la longitud de las cadenas de amilosa y las cadenas largas de amilopectina, las cuales influyen en la dureza de los geles del almidón, que, a su vez, está altamente relacionada con la gomosidad (Mua y Jackson, 1997). También se observó una correlación positiva entre el porcentaje de cristalinidad y la cohesividad ($r = 1.000$, $P < 0.05$) en los almidones autoclaveados de malanga y manzana, atribuido a la lixiviación de la amilosa de los gránulos y a su reasociación, ya que estos son los responsables de la formación de un gel cohesivo (Hedayati y Niakousari, 2018).

Los almidones nativos y autoclaveados de las fuentes no convencionales fueron diferentes al almidón nativo y autoclaveados de la fuente convencional. Y en los almidones lintnerizados, la malanga y maíz presentaron un porcentaje de cristalinidad similar, mientras que la manzana fue diferente a estos dos.

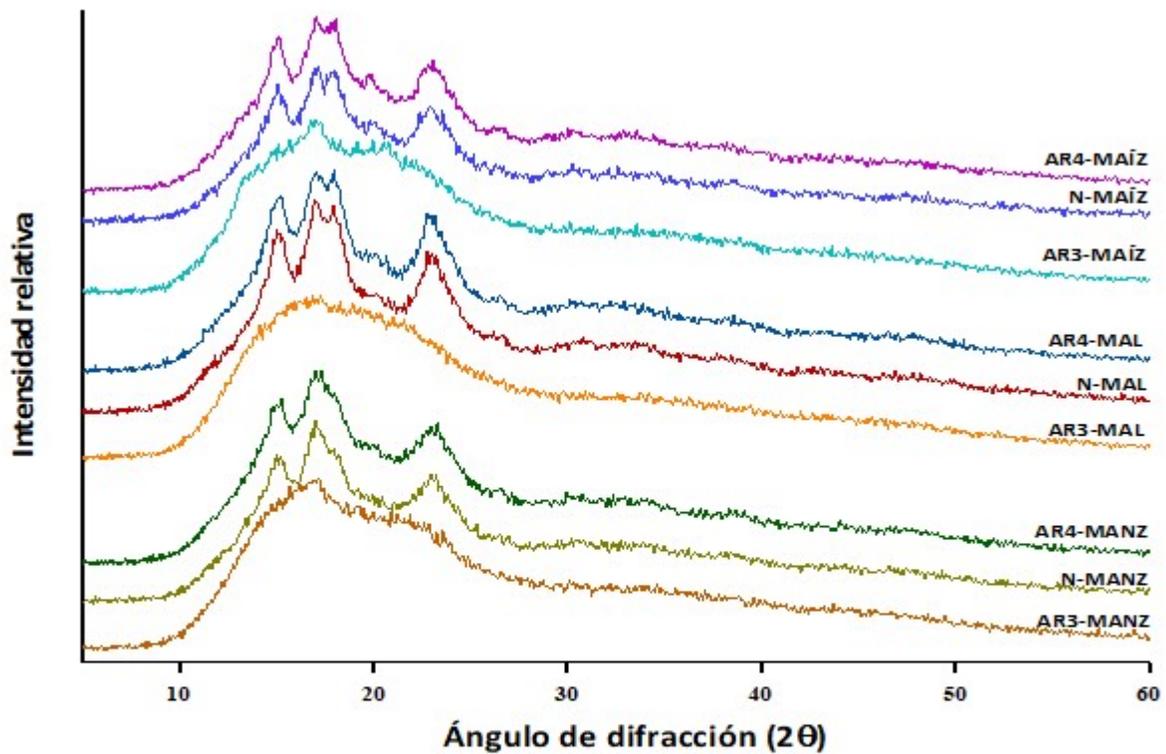


Figura 1. Ángulo de difracción de rayos X de almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

Cuadro 9. Porcentaje de cristalinidad de almidones nativos, autoclaveados y lintnerizados de maíz, malanga y manzana.

Muestra	% Cristalinidad
N-MAÍZ	38.03 ± 0.01 ^a
AR3-MAÍZ	26.63 ± 0.53 ^c
AR4-MAÍZ	31.05 ± 0.67 ^b
N-MAL	30.13 ± 0.04 ^b
AR3-MAL	23.33 ± 0.16 ^d
AR4-MAL	30.32 ± 0.55 ^b
N-MANZ	29.97 ± 0.06 ^b
AR3-MANZ	23.39 ± 0.35 ^d
AR4-MANZ	27.39 ± 0.51 ^c

Media aritmética de al menos cinco repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra, dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P > 0.05$). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.10. Análisis Moleculares (FTIR)

Los espectros de FTIR de almidones, se han utilizado para determinar el orden de corto alcance en la estructura a nivel molecular (Zhang *et al.*, 2014). El modo ATR es una técnica en el cual el haz de infrarrojo penetra en los primeros micrómetros (2 μm) de la muestra. Lo que implica que los espectros IR son representativos de la parte externa de los gránulos de almidón (Sevenou *et al.*, 2002). Los espectros de-convulados de los almidones nativos y modificados en un rango de 800 a 1200 cm^{-1} se muestran en la Figura 6, donde se resaltan las bandas de absorbancia 1047 cm^{-1} , asociada con estructuras cristalinas (amilopectina) y 1022 cm^{-1} relacionada con estructuras amorfas (amilosa), por lo cual, esta relación (1047/1022 cm^{-1}) se ha utilizado para cuantificar el grado de orden en los almidones, denominado índice de cristalinidad, mostrado en la Figura 7 (Sevenou *et al.*, 2002; Van Soest *et al.*, 1995).

Entre los almidones nativos, la proporción mayor fue para maíz (0.65), seguido de malanga (0.64) y posteriormente de manzana (0.63), las cuales no mostraron diferencias significativas entre ellas.

En los AR3 disminuyó la proporción en todos los almidones maíz (0.56), malanga (0.56) y manzana respectivamente (0.58), sin presentar diferencias significativas entre ellos, pero si respecto a su contra parte nativa ($P < 0.05$). Chung *et al.* (2009) observaron una disminución en las proporciones, al utilizar tratamientos de calor-humedad en almidones de maíz, chicharos (*P. sativum* L.) y lentejas (*L. culinaris*), esta disminución se atribuye a la reorientación helicoidal dentro de los dominios cristalinos o al rompimiento de enlaces hidrógeno que unen las dobles hélices adyacentes. Kittipongpatana *et al.* (2011) observaron un fenómeno similar en AR3 (pregelatinizados) de cotiledones de jaca, en donde la proporción fue menor que la del almidón nativo, sugiriendo así, una disminución de la estructura ordenada. Esto también se ha visto en almidón ceroso de arroz el cual podría atribuirse a la disociación y el desenredado de las dobles hélices que forman la matriz cristalina (Zeng *et al.*, 2015).

En los AR4, la proporción mayor fue en el siguiente orden: Malanga (0.64), maíz (0.63) y manzana (0.61). En dicha proporción, no se vio ningún cambio o modificación con respecto a su contra parte

nativa, aunque en la lintnerización se observó una disminución en la proporción de maíz y manzana, sin embargo, no fue significativa. Lo cual indica que la cristalinidad del almidón se interrumpió por acción de la modificación. Resultados similares fueron reportados por Chen *et al.* (2017) en almidón de raíz de Kuduzu modificado por reticulación.

Los resultados obtenidos en esta determinación fueron consistentes con los valores de porcentaje de cristalinidad obtenidos por difracción de rayos X, aunque esta técnica mide el ordenamiento molecular de largo alcance en los almidones.

Respecto al índice de cristalinidad en los almidones nativos y autoclaveados de malanga y manzana no se mostraron diferencias conforme a la fuente convencional, sin embargo, en los almidones lintnerizados, dicha proporción fue similar en las fuentes no convencionales, respecto al AR4-MAÍZ.

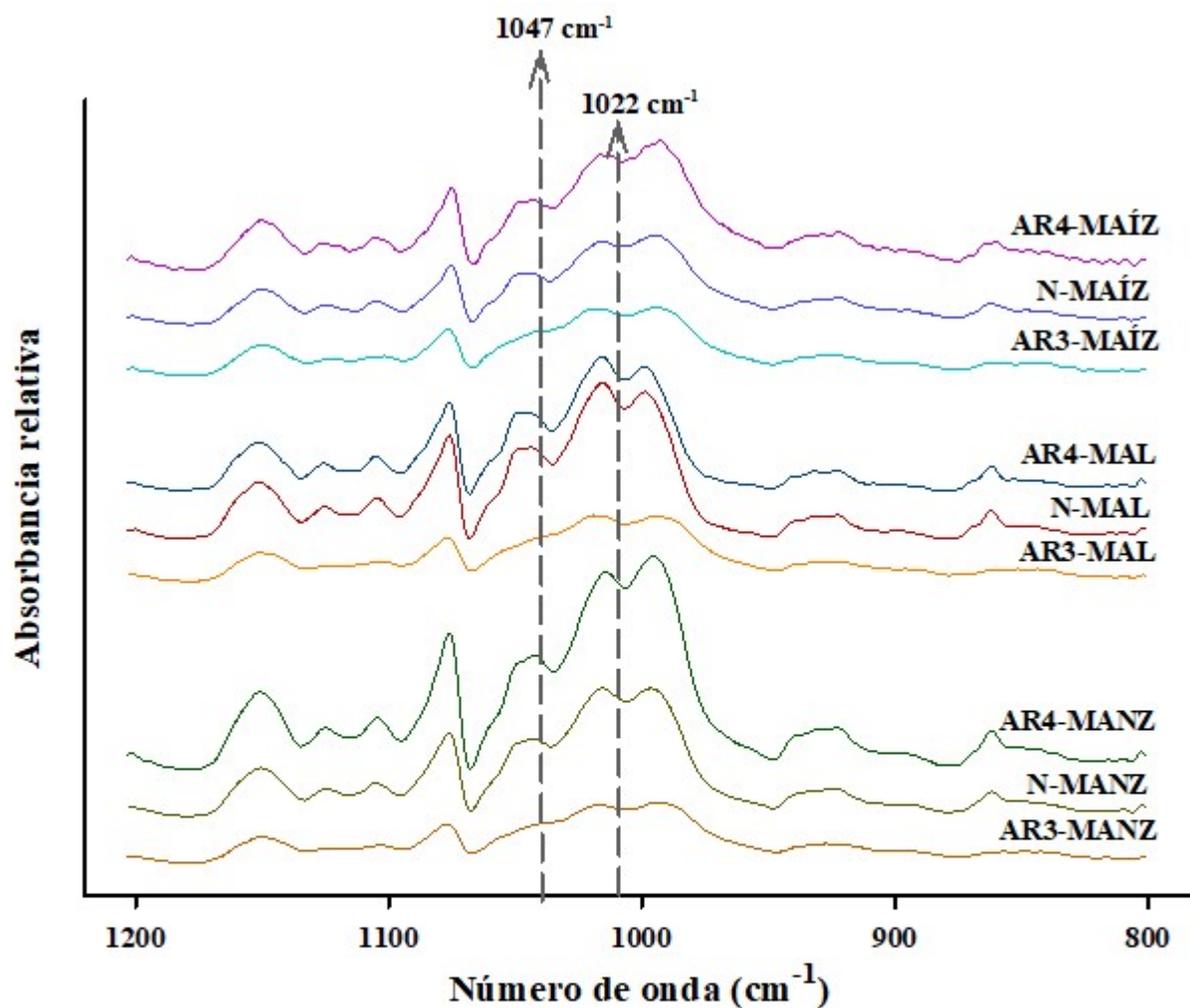


Figura 1. Espectros de-convulados de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

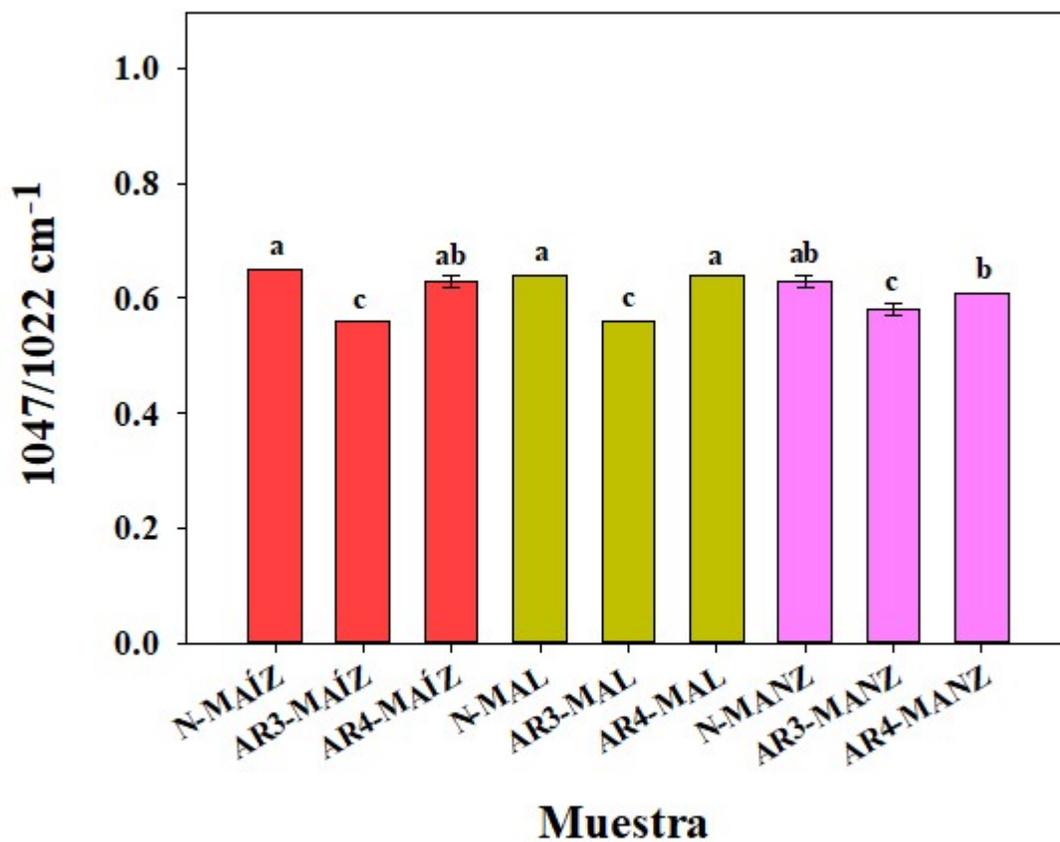


Figura 1. Índice de cristalinidad ($1047/1022 \text{ cm}^{-1}$) en almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana. La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

7.11. Análisis Reológicos

Todas las dispersiones de almidón, sin importar la temperatura, mostraron un comportamiento de flujo no-Newtoniano del tipo corte adelgazante o también denominado “pseudoplástico”. Este comportamiento se caracteriza por presentar valores de índice de comportamiento de flujo (n) menores a 1 (Figura 8) (Tirado-Gallegos *et al.*, 2016; Pepe *et al.*, 2015). De acuerdo con Pepe *et al.* (2015) los materiales con comportamientos pseudoplásticos se caracterizan por presentar un aumento en el esfuerzo cortante con el incremento en la velocidad de corte, en las Figuras 9-11 (todas con una bondad de ajuste al modelo de Ley de Potencia de $R^2 > 0.98$; valor no mostrado). En la Figura 8, se observó que, de 25 a 50 °C, este índice de comportamiento de flujo (n) aumentó en los almidones N-MAÍZ, AR3-MAÍZ, AR4-MAÍZ, AR4-MAL, N-MANZ y AR4-MANZ ($P < 0.05$). De 50 a 70 °C, el aumento en la variable reológica “ n ” solo fue significativa en los almidones AR3-MAÍZ y AR4-MANZ. Comparando los almidones nativos con los modificados, en los AR3 y AR4 de maíz y manzana, el índice de comportamiento de flujo fue mayor con respecto a su contraparte nativa, lo que indicó que las modificaciones utilizadas (autoclaveado y lintnerización) influyeron en dicho índice. En almidón de malanga, el índice n fue significativamente mayor en el almidón AR4, en comparación con el almidón nativo y AR3 de la misma fuente botánica.

A 25 °C el almidón N-MANZ y AR3-MANZ mostraron un índice de flujo similar a los almidones de maíz. A 50 °C, el AR3-MANZ fue similar a la fuente convencional. Por otro lado, a 70 °C no se mostraron similitudes. En conclusión, todos los almidones mostraron un comportamiento de flujo no-Newtoniano.

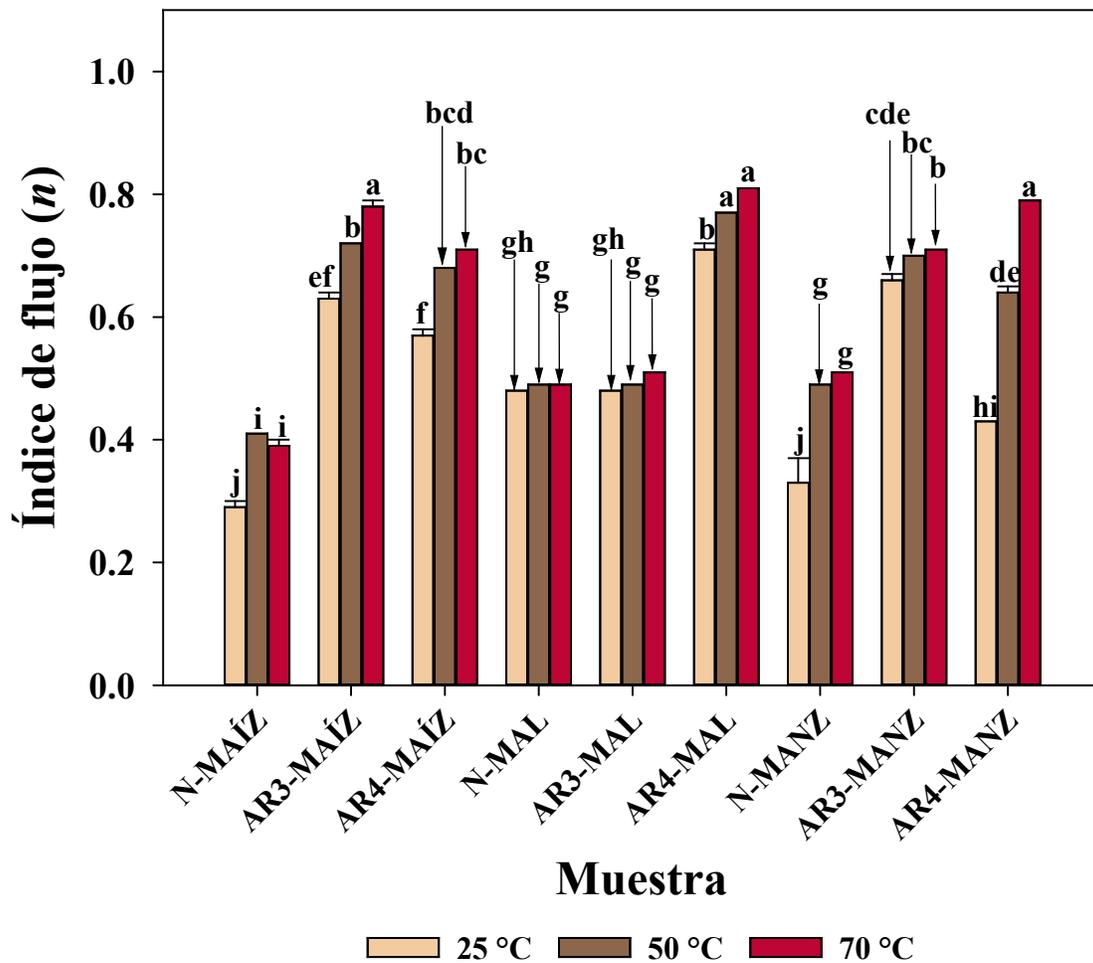


Figura 5. Índice de comportamiento de flujo (n) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

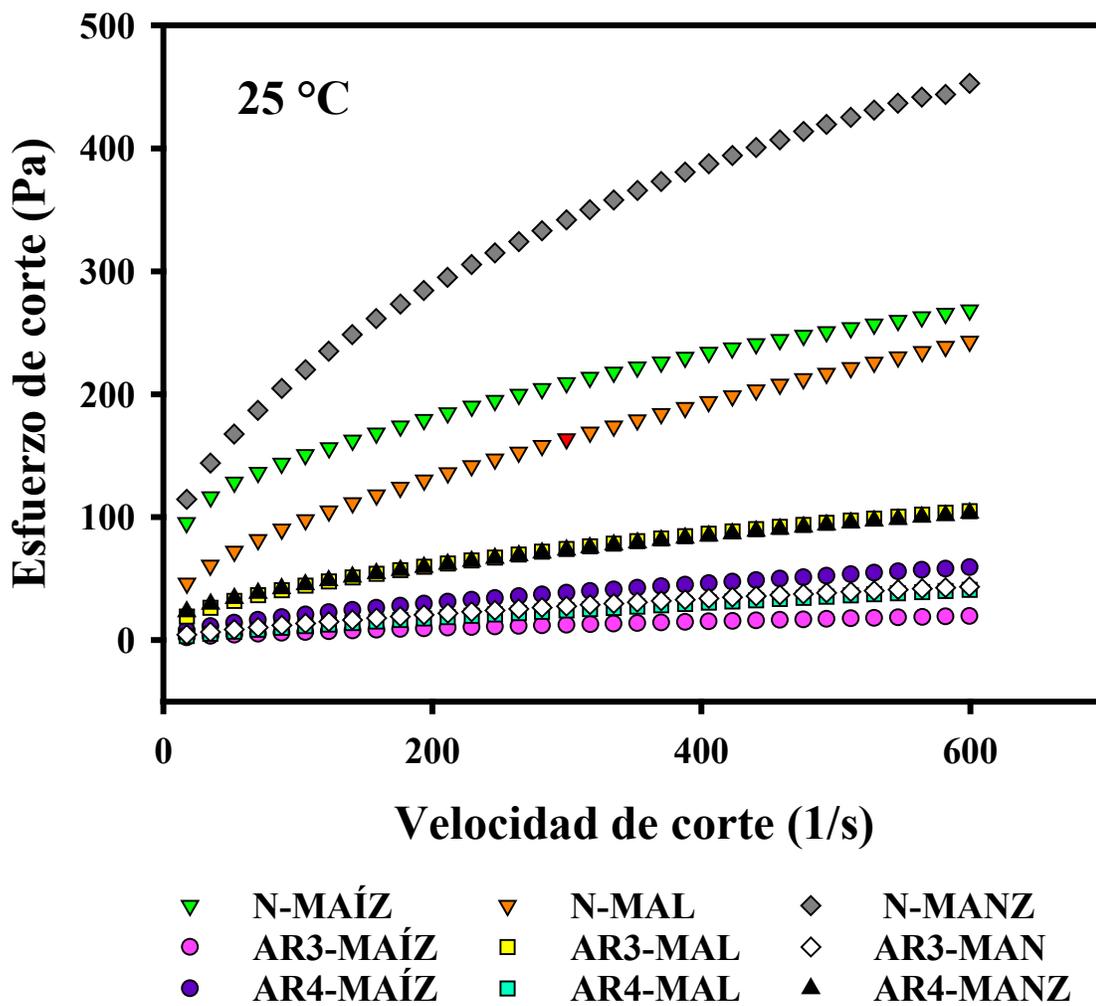


Figura 6. Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 25 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

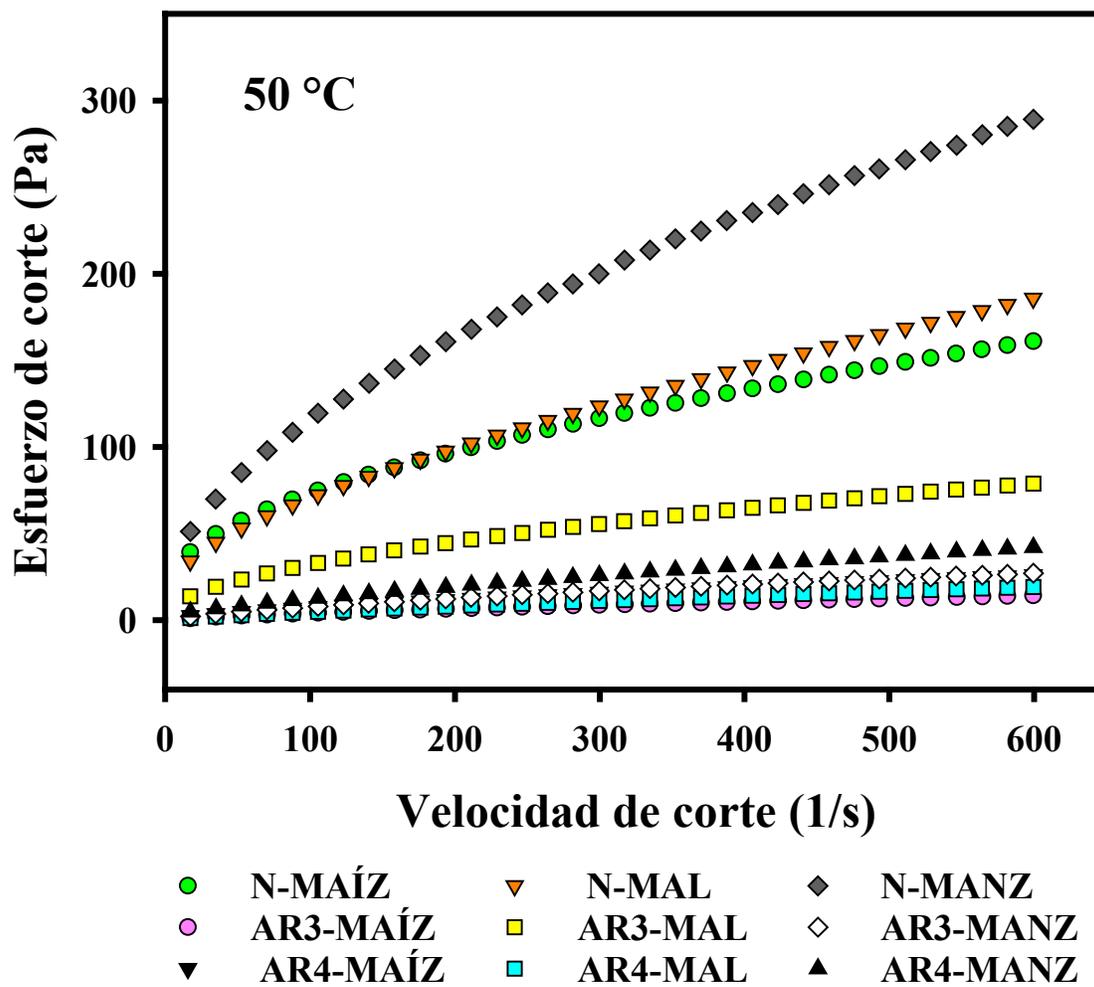


Figura 7. Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 50 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

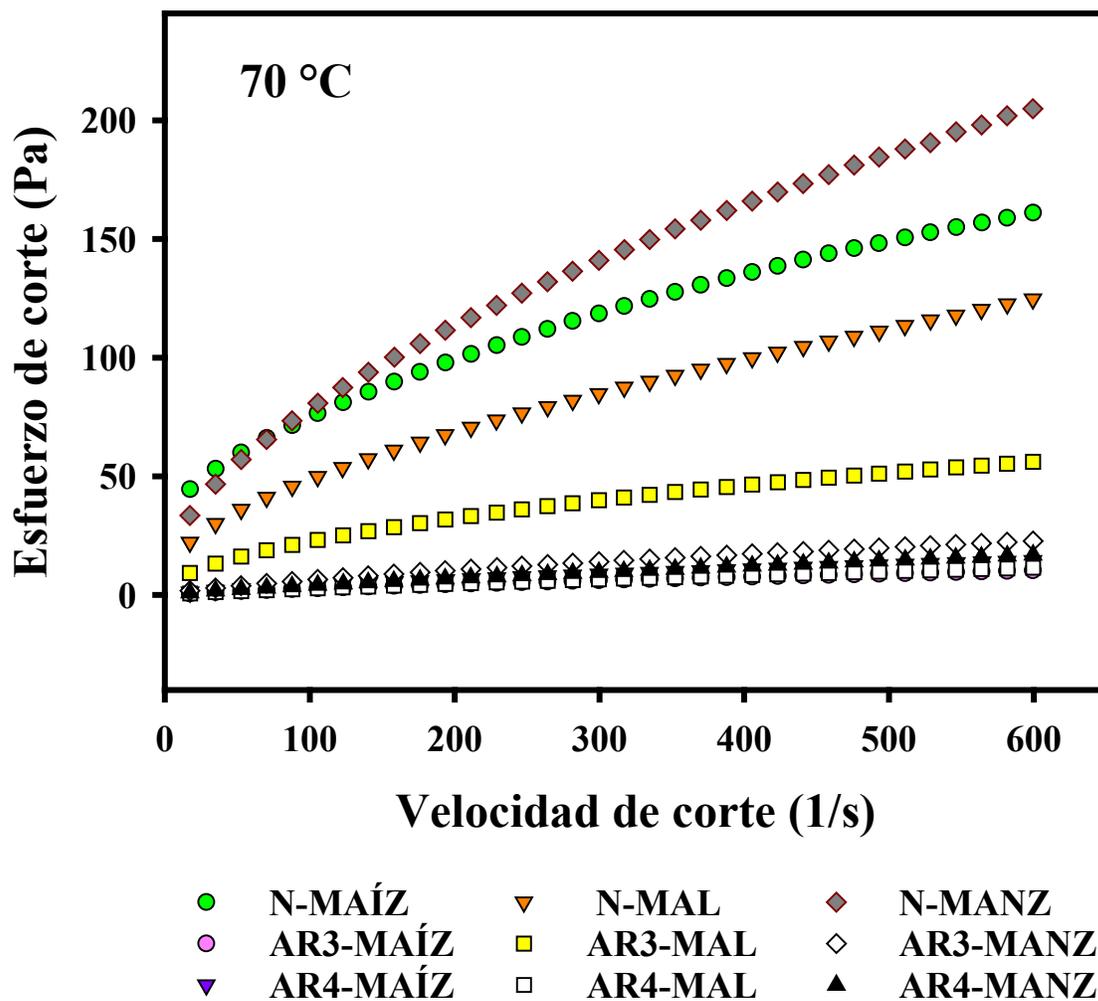


Figura 8. Variación del esfuerzo cortante con la velocidad de corte a 70 °C de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

En la Figura 12, se observa el comportamiento de la variable reológica conocida como índice de consistencia (k), la cual es una analogía de la viscosidad aparente y representa la resistencia estructural de una solución o dispersión (Shah *et al.*, 2016). A 25 °C se obtuvieron los mayores valores de k , tanto en los almidones nativos como en los modificados. En los almidones nativos, se observó un mayor valor de k ($P < 0.05$) en maíz y manzana (37.9 y 35.3 Pa·sⁿ) con respecto a la malanga (10.45 Pa·sⁿ), lo que se atribuyó al peso molecular, se ha observado que, a mayor PM, mayor es la viscosidad (Liu *et al.*, 2006). También este aumento se ha relacionado con el tamaño de gránulo (Espinosa-Solís *et al.*, 2009), donde a mayor tamaño, se presentó una viscosidad aparente mayor. Otro factor en este comportamiento es el contenido de humedad (Xie *et al.*, 2009), a menor contenido de humedad se mostró mayor viscosidad; sin embargo, el índice disminuyó conforme aumentó la temperatura (de 25 a 70 °C), esto es mostrado en las Figuras 9, 10 y 11 donde se exhibió que este comportamiento fue afectado por la temperatura, ya que se presentó un menor esfuerzo cortante conforme a la temperatura, aunque solo fue significativo en N-MAÍZ, N-MAL, N-MANZ y AR4-MANZ. Dicha disminución pudo deberse a los incrementos en las distancias intermoleculares dentro de la red de almidón como resultado de la expansión térmica al aumentar la temperatura (Constenla *et al.*, 1989). Este fenómeno físico, ya fue reportado por Kim y Yoo (2009) en dispersiones de almidón de bellota a diferentes concentraciones (4, 5, 6 y 7%) al incrementar la temperatura de 25 a 70 °C.

Los almidones modificados por hidrólisis ácida (lintnerización) y autoclaveado, presentaron índices de consistencia k menores a los nativos debido al contenido de amilosa el cual es menor en los AR3 y AR4 que en los almidones nativos, por lo que, a un bajo contenido de amilosa, menor viscosidad aparente (Xie *et al.*, 2009). Se observó que los valores de k en los almidones de maíz y manzana (de las muestras AR3 y AR4) no presentaron diferencia significativa ($P > 0.05$); mientras que, en el almidón de malanga, el valor de k en AR3 fue mayor que en AR4, aunque no se observó diferencia significativa ($P > 0.05$) a partir de los 50 °C. De manera general los almidones modificados (AR3 y AR4) disminuyeron significativamente ($P < 0.05$) su índice de consistencia conforme a su contra parte nativa. Diversos autores han reportado comportamientos similares, Pepe *et al.* (2015) observaron una disminución en el índice de consistencia en los almidones de arrurruz (*M. arundinacea* L.) modificados físicamente, al igual que Shah *et al.* (2016) en almidón de avena con tratamiento dual de autoclaveado-retrogradación, donde lo atribuyen a la lixiviación de la

amilosa durante el proceso de modificación física. Siroha y Sandhu (2018) observaron también una disminución en el índice de consistencia (k) en los almidones entrecruzados de cultivares de Pearl Millet (*P. glaucum* L.) -cereal cultivado en África- en comparación con su contra parte nativa, lo cual lo atribuyeron a una disminución en la solubilidad y el poder de hinchamiento de los almidones reticulados (entrecruzados) debido a una menor absorción de agua causada por el tipo de modificación química.

A 25 °C el almidón N-MAL y AR3-MANZ y AR4-MAL mostraron un índice de consistencia similar a los respectivos almidones de maíz. A 50 °C, los almidones nativos, AR3 y AR4 de malanga y manzana fueron similares a los almidones nativos y modificados de la fuente convencional. Por otro lado, a 70 °C, los AR3 y AR4 de las fuentes convencionales fueron similares a los respectivos almidones modificados de la fuente convencional.

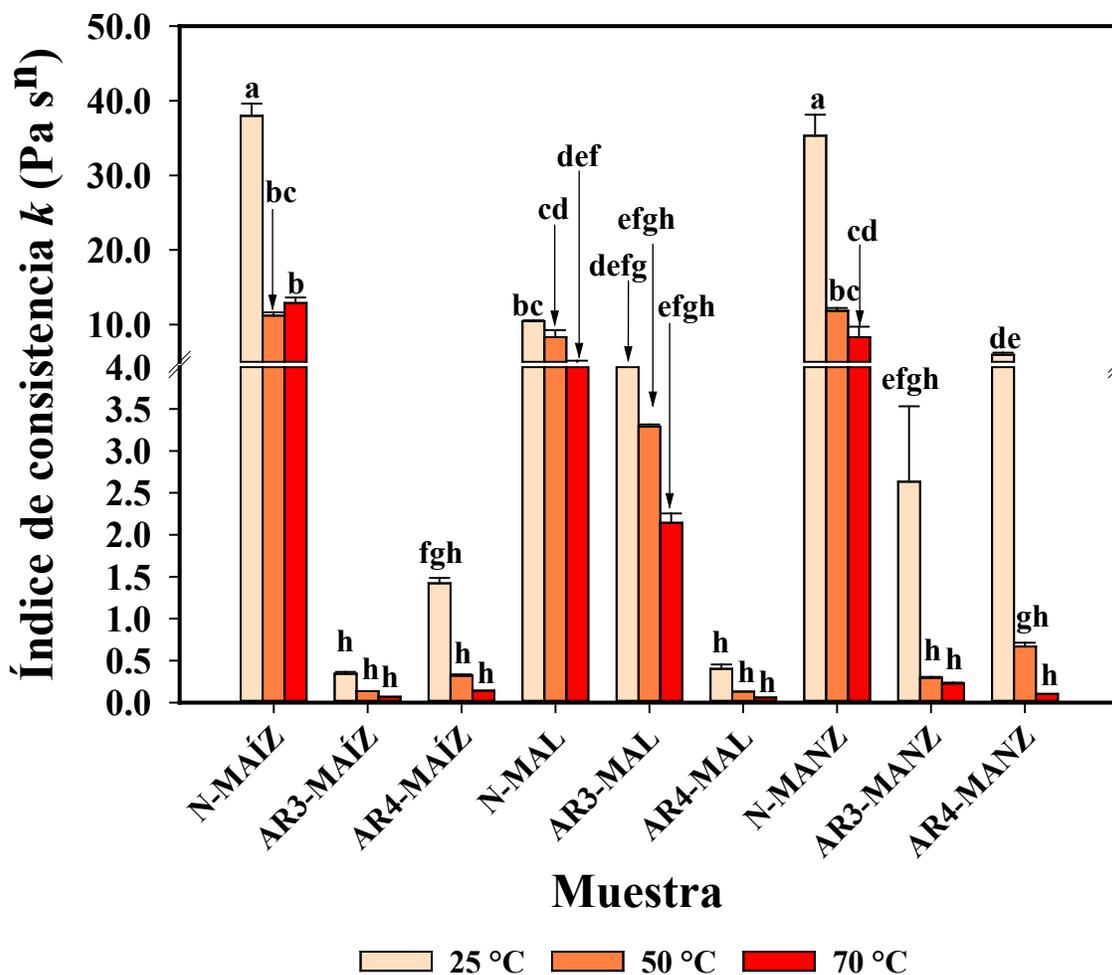


Figura 9. Índice de consistencia (k) de los almidones nativos y modificados de maíz, malanga y manzana al 7.5% (p/p). La nomenclatura utilizada para las muestras fue: N (Nativo), AR3 (autoclaveado), AR4 (lintnerizado), MAL (malanga) y MANZ (manzana).

8. CONCLUSIONES

Todas las muestras de almidones (nativos y modificados, independientemente de la fuente botánica) presentaron valores menores al 1% de proteínas, lípidos y ceniza lo cual indicó una pureza adecuada. La mayoría de los almidones estudiados presentaron elevada blancura, a excepción de los AR3-MANZ y AR3-MAL. Los almidones lintnerizados del presente estudio son más blancos que los autoclaveados, siendo favorable para su uso industrial, ya que esto es representativo de calidad y pureza. En relación a la morfología, los almidones nativos de maíz y malanga mostraron formas poliédricas y el almidón nativo de manzana presentó una forma redonda y de domo. Se observó una pérdida de la integridad física de los gránulos debido el tratamiento térmico por las altas temperaturas en los almidones autoclaveados; mientras que en los almidones lintnerizados la morfología granular no se alteró significativamente. El almidón N-MAL mostró el tamaño promedio de gránulo más pequeño, seguido del almidón N-MANZ, mientras que el tamaño más grande fue el N-MAÍZ. El contenido de amilosa mayor se presentó en N-MAL, seguido de N-MAÍZ y posteriormente N-MANZ. En cuanto al PM se presentó en el siguiente orden descendente N-MAÍZ > N-MANZ > N-MAL. El contenido de amilosa y peso molecular disminuyó en los AR3 y AR4 de todas las fuentes botánicas estudiadas, en comparación con sus homólogos (almidones nativos). En ISA, los almidones nativos y lintnerizados aumentaron la solubilidad conforme aumentó la temperatura. Los AR4 en general fueron más solubles con respecto a los AR3 y nativos. En IAA, a 80 °C, el almidón N-MANZ fue el que absorbió más agua. En los almidones autoclaveados y lintnerizados a los 70 y 80 °C fueron menores que los nativos, en todas las fuentes botánicas analizadas, un comportamiento que coincidió con el mayor contenido de AR. Respecto al poder de hinchamiento, el N-MANZ a 80 °C mostró el mayor hinchamiento, en los AR3 a esta misma temperatura, el poder de hinchamiento disminuyó. En los AR4 de manzana y malanga esta disminución también se presentó. El contenido de almidón total fue mayor al 90% en los almidones nativos, lo que indicó alta pureza. El AD fue superior en los almidones nativos que en los modificados. En cuanto al AR, el almidón nativo y modificados de malanga, son los que presentaron mayores cantidades de AR y son diferentes y superiores a los almidones de la fuente convencional. Se obtuvo mayor cantidad de AR en los almidones autoclaveados que en los lintnerizados. Las fuentes no convencionales y los procedimientos utilizados, fueron viables para

la obtención y preparación de AR, ya que se generaron almidones con cantidades similares y en algunos casos mayores que los reportados en los almidones de fuentes convencionales y no convencionales. El contenido de ARr en todas las muestras de almidón fue menor al 2%, sin embargo, la literatura científica al respecto es escasa o limitada, por lo cual se sugiere la realización de estudios adicionales en torno a estos fenómenos subyacentes. En el análisis de perfil de textura, el almidón nativo de manzana mostró la mayor dureza; mientras que en los almidones modificados (AR3 y AR4) la dureza disminuyó significativamente. Y esta misma tendencia se mostró en gomosidad y masticabilidad. Los AR4 y AR3 podrían ser adecuados para postres como pudines y natillas, donde son deseables la formación de un gel débil y una textura de menor gomosidad. En general, los geles (de almidones) de menor dureza, menor masticabilidad y gomosidad pueden tener este tipo de aplicaciones como aditivos en postres. Con respecto a las propiedades térmicas analizadas por calorimetría diferencial de barrido, los AR3 no presentaron temperatura de gelatinización, por lo tanto, no se observaron las temperaturas de transición térmica, debido a un reordenamiento molecular, afectando la hidratación y la capacidad de absorción de agua. En las entalpías de gelatinización los AR4 de maíz y malanga mostraron una disminución y el AR4-MANZ un aumento conforme a su contra parte nativa. Los almidones nativos de maíz y malanga mostraron un patrón difracción de rayos X tipo A y el almidón de manzana tipo B. Estos patrones se afectaron por el autoclaveado; mientras que la lintnerización no afectó dichos patrones. La cristalinidad relativa disminuyó en los AR3, y en los AR4, disminuyó solo en manzana y en maíz. El índice de cristalinidad obtenido de los espectros de-convulados de FTIR, fue mayor para los almidones nativos independientemente de la fuente botánica, sin embargo, en los AR4 no se mostró ningún cambio significativo en comparación con los almidones nativos, mientras que, en los AR3, dicho índice de cristalinidad disminuyó en todos los almidones.

Todos los almidones presentaron un comportamiento no-Newtoniano del tipo pseudoplástico, en la cual la variable del índice de consistencia (k) disminuyó conforme aumentó la temperatura, esta variable k fue menor en los AR3 y AR4 que en los almidones nativos.

De manera general los almidones de manzana mostraron más similitud con los almidones de la fuente convencional. Los almidones de malanga mostraron comportamientos más diferentes a la fuente convencional, sin embargo, no se descarta la posibilidad de ser una fuente no convencional

alternativa, para disminuir las demandas comerciales de los almidones de fuentes convencionales, con propiedades de interés tecnológico específicas.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios a nivel de organización de las estructuras de las dobles hélices de la amilopectina y su configuración en estructuras de empaquetamientos diferentes y el peso molecular de este polisacárido.

En caso de que se requiera aumentar los rendimientos de AR, se recomendaría probar un tratamiento dual de lintnerización-autoclave para incrementar estos valores.

La técnica de autoclaveado, también se puede utilizar para aumentar el contenido de AR, pero a diferentes tiempos y temperaturas.

Se recomienda optimizar el rendimiento de los ARs y probar los beneficios que trae a la salud.

10. REFERENCIAS

- Aboubakar, N. Y., Scher, J., & Mbofung, C. M. F. 2008. Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 294-305.
- Amaya-Llano, S. L., Martínez-Bustos, F., Alegría, A. L. M., & de Jesús Zazueta-Morales, J. 2011. Comparative studies on some physicochemical, thermal, morphological, and pasting properties of acid-thinned jicama and maize starches. *Food and Bioprocess Technology*, 4(1), 48-60.
- Anderson, R. A. 1969. Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4-12.
- Annison, G., Illman, R. J., & Topping, D. L. 2003. Acetylated, propionylated or butyrylated starches raise large bowel short-chain fatty acids preferentially when fed to rats. *The Journal of Nutrition*, 133(11), 3523-3528.
- Anónimo. (2014). Perfil de mercado de la malanga. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Gobierno de la republica de Honduras. Recuperado de: pronagro.sag.gob.hn/dmsdocument/4074.
- Amanze, K. O. 2009. The proximate composition and the anti-nutritional factors in seven varieties of cocoyam (*Colocasia and Xanthosoma*). *Journal of Reseach and National Development*, 7(2).
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2002. Official Methods of Analysis. Sub. 4.1.10. Gaithersburg, MA, USA.
- Aparicio-Saguilán, A., Flores-Huicochea, E., Tovar, J., García-Suárez, F., Gutiérrez-Meraz, F., & Bello-Pérez, L. A. 2005. Resistant starch-rich powders prepared by autoclaving of native and lintnerized banana starch: Partial characterization. *Starch-Stärke*, 57(9), 405-412.
- Aparicio-Saguilán, A., Gutiérrez-Meraz, F., García-Suárez, F. J., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. 2008. Physicochemical and functional properties of cross-linked banana resistant starch. Effect of pressure cooking. *Starch-Stärke*, 60(6), 286-291.
- Aparicio-Saguilán, A., Valera-Zaragoza, M., Perucini-Avenidaño, M., Páramo-Calderón, D. E., Aguirre-Cruz, A., Ramírez-Hernández, A., & Bello-Pérez, L. A. 2015. Lintnerization of banana starch isolated from underutilized variety: morphological, thermal, functional properties, and digestibility. *CyTA-Journal of Food*, 13(1), 3-9.
- ASERCA. 1995. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. *Revista claridades agropecuarias*. Abriendo surcos, producción de manzana. Recuperado de: <http://www.aserca.gob.mx>.
- Ashwar, B. A., Gani, A., Shah, A., Wani, I. A., & Masoodi, F. A. 2016. Preparation, health benefits and applications of resistant starch—A review. *Starch-Stärke*, 68(3-4), 287-301.

- 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: *In vitro* digestibility, thermal and structural characterization. *Food Hydrocolloids*, 56, 108-117.
- Ashwar, B. A., Gani, A., Shah, A., & Masoodi, F. A. 2017. Physicochemical properties, *in-vitro* digestibility and structural elucidation of RS4 from rice starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 471-477.
- Babu, A. S., Mahalakshmi, M., & Parimalavalli, R. 2014. Comparative Study on Properties of Banana Flour, Starch and Autoclaved Starch. *Trends in Carbohydrate Research*, 6(1).
- Badui Dergal Salvador. 2006. Química de los alimentos. PEARSON EDUCACIÓN. Cuarta edición. México. 736 p.
- Baughar, A. 2003. Anatomy and taxonomy. In: Baughar, A. y S. Singha (eds.). Concise encyclopedia of temperate tree fruit. Food Products Press, New York, NY. 3-8 pp.
- Bello-Pérez, L. A., González-Soto, R. A., Sánchez-Rivero, M. M., Gutiérrez-Meraz, F., & Vargas-Torres, A. 2006. Extrusion of starches from non-conventional sources for resistant starch production. *Agrociencia*, 441-448.
- Bello-Pérez, L. A., Rendón-Villalobos, J. R., Agama-Acevedo, E., & Islas-Hernández, J. J. 2006. *In vitro* starch digestibility of tortillas elaborated by different masa preparation procedures. *Cereal Chemistry*, 83(2), 188-193.
- Bello-Pérez, L. A., Meza-León, K., Contreras-Ramos, S., & Paredes-López, O. 2001. Functional properties of corn, banana and potato starch blends. *Acta Científica Venezolana*, 52(1), 62-67.
- Berry, C. S. 1986. Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fiber. *Journal of Cereal Science*, 4(4), 301-314.
- Berski, W., Ptaszek, A., Ptaszek, P., Ziobro, R., Kowalski, G., Grzesik, M., & Achremowicz, B. J. C. P. 2011. Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 665-671.
- Biliaderis, C. G., Maurice, T. J., & Vose, J. R. 1980. Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*, 45(6), 1669-1674.
- Bradbury, J.H. and Holloway, W.D. 1988. Chemistry of tropical root crops: Significance for nutrition and agriculture in the Pacific. Australian Centre for International Research, Canberra. 22-63 pp.
- Brummer, Y. and Cui, S. W. 2005. Understanding Carbohydrate Analysis. In, Cui, S. W. (Ed.). Food Carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications. CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL, USA. 418 pp.
- Bustillos-Rodríguez, J. C., Tirado-Gallegos, J. M., Ordoñez-García, M., Zamudio-Flores, P. B., Ornelas-Paz, J. D. J., Acosta-Muñiz, C. H. & Rios-Velasco, C. 2018. Physicochemical, thermal and rheological properties of three native corn starches. *Food Science and Technology*, 39(1), 149-157.
- Bustillos-Rodríguez, J. C., Ordoñez-García, M., Tirado-Gallegos, J. M., Zamudio-Flores, P. B., de Jesús Ornelas-Paz, J., Acosta-Muñiz, C. H. & Aparicio-Saguilán, A. 2019.

- Physicochemical, Thermal and Rheological Properties of Native and Oxidized Starch from Corn Landraces and Hybrids. *Food Biophysics*, 14(2), 182-192.
- Cai, C., Wei, B., Tian, Y., Ma, R., Chen, L., Qiu, L., & Jin, Z. 2019. Structural changes of chemically modified rice starch by one-step reactive extrusion. *Food Chemistry*, 288, 354-360.
- Cai, J., Cai, C., Man, J., Xu, B., & Wei, C. 2015. Physicochemical properties of ginkgo kernel starch. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 380-391.
- Castanha, N., Villar, J., da Matta Junior, M. D., dos Anjos, C. B. P., & Augusto, P. E. D. 2018. Structure and properties of starches from Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) roots. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 1029-1038.
- Carlos, A.F. 2010. Propiedades físicoquímicas de digestibilidad de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) sometido a una modificación dual. Tesis de maestría. Centro de desarrollo de productos bióticos del Instituto Politécnico Nacional.
- Cárdenas, J., & Fischer, G. 2013. Clasificación botánica y morfología. En: Miranda, D., Fischer, G. y Carranza, C. (eds.). Los frutales caducifolios en Colombia. Situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas, Bogotá, Colombia, 21-29.
- Constenla, D. T., Lozano, J. E., & Crapiste, G. H. 1989. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Science*, 54(3), 663-668.
- Correia, P. R., Nunes, M. C., & Beirão-da-Costa, M. L. 2012. The effect of starch isolation method on physical and functional properties of Portuguese nuts starches. I. Chestnuts (*Castanea sativa* Mill. var. Martainha and Longal) fruits. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 256-263.
- Chandla, N. K., Saxena, D. C., & Singh, S. 2017. Processing and evaluation of heat moisture treated (HMT) amaranth starch noodles; An inclusive comparison with corn starch noodles. *Journal of Cereal Science*, 75, 306-313.
- Chávez-Murillo, C. E., Wang, Y. J., & Bello-Pérez, L. A. 2008. Morphological, physicochemical and structural characteristics of oxidized barley and corn starches. *Starch-Stärke*, 60(11), 634-645.
- Chen, B., Dang, L., Zhang, X., Fang, W., Hou, M., Liu, T., & Wang, Z. 2017. Physicochemical properties and micro-structural characteristics in starch from kudzu root as affected by cross-linking. *Food Chemistry*, 219, 93-101.
- Chinnici, F., Bendini, A., Gaiani, A., & Riponi, C. 2004. Radical scavenging activities of peels and pulps from cv. Golden Delicious apples as related to their phenolic composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4684-4689.
- Chung, H. J., Liu, Q., & Hoover, R. 2009. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydrate Polymers*, 75(3), 436-447.
- Da Rosa Zavareze, E., El Halal, S. L. M., Diego, G., Helbig, E., Pereira, J. M., & Dias, A. R. G. (2012). Resistant starch and thermal, morphological and textural properties of heat-

- moisture treated rice starches with high-, medium- and low-amylose content. *Starch-Stärke*, 64(1), 45-54.
- Dai, L., Qiu, C., Xiong, L., & Sun, Q. 2015. Characterisation of corn starch-based films reinforced with taro starch nanoparticles. *Food Chemistry*, 174, 82-88.
- Deka, D., & Sit, N. 2016. Dual modification of taro starch by microwave and other heat moisture treatments. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 416-422.
- Dhital, S., Shrestha, A. K., Hasjim, J., & Gidley, M. J. 2011. Physicochemical and structural properties of maize and potato starches as a function of granule size. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(18), 10151-10161.
- Dundar, A. N., & Gocmen, D. 2013. Effects of autoclaving temperature and storing time on resistant starch formation and its functional and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 764-771.
- Eberhardt, M. V., Lee, C. Y., & Liu, R. H. 2000. Nutrition: Antioxidant activity of fresh apples. *Nature*, 405(6789), 903.
- El Halal, S. L. M., Colussi, R., Pinto, V. Z., Bartz, J., Radunz, M., Carreño, N. L. V. & da Rosa Zavareze, E. 2015. Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidized barley starches. *Food Chemistry*, 168, 247-256.
- Elmståhl, H. L. 2002. Resistant starch content in a selection of starchy foods on the Swedish market. *European Journal of Clinical Nutrition*, 56(6), 500-505.
- Englyst, H. N., & Cummings, J. H. 1986. Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiaca* sapientum) in the human small intestine. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 44(1), 42-50.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46, S33-50.
- Espinosa Cuéllar, E., Herrera Isla, L., Espinosa Cuéllar, A., Dávila Martínez, A., Bernal Cabrera, A., & Simó González, J. 2017. Respuesta de cultivares de malanga (*Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott) a las pudriciones secas. *Centro Agrícola*, 44(1), 13-22.
- Espinosa-Solís, V., Jane, J. L., & Bello-Pérez, L. A. 2009. Physicochemical characteristics of starches from unripe fruits of mango and banana. *Starch-Stärke*, 61(5), 291-299.
- EURESTA. 1992. European flair action concerted on resistant starch. EURESTA Newaletter III:7
- Falade, K. O., & Okafor, C. A. 2013. Physicochemical properties of five cocoyam (*Colocasia esculenta* and *Xanthosoma sagittifolium*) starches. *Food Hydrocolloids*, 30(1), 173-181.
- Franco, C. M., Cabral, R. A., & Tavares, D. Q. 2002. Structural and physicochemical characteristics of lintnerized native and sour cassava starches. *Starch-Stärke*, 54(10), 469-475.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M. J., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. 2010. Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43(4), 931-942.

- Gao, J., Vasanthan, T., Hoover, R., & Li, J. 2012. Structural modification of waxy, regular, and high-amylose maize and hullless barley starches on partial acid hydrolysis and their impact on physicochemical properties and chemical modification. *Starch-Stärke*, 64(4), 313-325.
- García, A. D., Cambrodón, I. G., & Carrón, N. M. 1997. Funcionalidad de los almidones de la diega: digestión y fermentación. *Alimentaria: Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos*, (284), 65-70.
- García-Tejeda, Y. V., Zamudio-Flores, P. B., Bello-Pérez, L. A., Romero-Bastida, C. A., & Solorza-Feria, J. 2011. Oxidación del almidón nativo de plátano para su uso potencial en la fabricación de materiales de empaque biodegradables: caracterización física, química, térmica y morfológica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(3), 125-135.
- González-Soto, R. A., Agama-Acevedo, E., Solorza-Feria, J., Rendón-Villalobos, R., & Bello-Pérez, L. A. 2004. Resistant starch made from banana starch by autoclaving and debranching. *Starch-Stärke*, 56(10), 495-499.
- González-Soto, R. A., Mora-Escobedo, R., Hernandez-Sanchez, H., Sanchez-Rivera, M., & Bello-Perez, L. A. 2007. The influence of time and storage temperature on resistant starch formation from autoclaved debranched banana starch. *Food Research International*, 40(2), 304-310.
- Goñi, I., García-Díaz, L., Mañas, E., & Saura-Calixto, F. 1996. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. *Food Chemistry*, 56(4), 445-449.
- Graf, B. L., Zhang, L., Corradini, M. G., Kuhn, P., Newman, S. S., Salbaum, J. M., & Raskin, I. (2018). Physicochemical differences between malanga (*Xanthosoma sagittifolium*) and potato (*Solanum tuberosum*) tubers are associated with differential effects on the gut microbiome. *Journal of Functional Foods*, 45, 268-276.
- Hidayat, B., Muslihudin, M., & Akmal, S. 2018. Application of autoclaving-cooling cycling treatment to improve resistant starch content of corn-based rice analogues. *In Journal of Physics: Conference Series* 953(1), IOP Publishing.
- Hedayati, S., & Niakousari, M. 2018. Microstructure, pasting and textural properties of wheat starch-corn starch citrate composites. *Food Hydrocolloids*, 81, 1-5.
- Hernández-Nava, R. G., Bello-Pérez, L. A., San Martín-Martínez, E., Hernández-Sánchez, H., & Mora-Escobedo, R. 2011. Effect of extrusion cooking on the functional properties and starch components of lentil/banana blends: Response surface analysis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3).
- Higgins, J. A., Higbee, D. R., Donahoo, W. T., Brown, I. L., Bell, M. L., & Bessesen, D. H. 2004. Resistant starch consumption promotes lipid oxidation. *Nutrition & Metabolism*, 1(1), 8.
- Holm, J., Hagander, B., Björck, I., Eliasson, A. C., & Lundquist, I. 1989. The effect of various thermal processes on the glycemic response to whole grain wheat products in humans and rats. *The Journal of Nutrition*, 119(11), 1631-1638.
- Hoover, R., Sinnott, A. W., & Perera, C. 1998. Physicochemical characterization of starches from *Amaranthus cruentus* grains. *Starch-Stärke*, 50(11-12), 456-463.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253-267.

- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Yee-Madeira, H., Rodriguez-Garcia, M. E., & Aguirre-Cruz, A. 2017. Characterization of the flour and starch of aroid cultivars grown in Mexico. *Starch-Stärke*, 69(9-10), 1600370.
- Van Hung, P., Vien, N. L., & Phi, N. T. L. 2016. Resistant starch improvement of rice starches under a combination of acid and heat-moisture treatments. *Food Chemistry*, 191, 67-73.
- Iglesias, I., Carbó, J., Bonany, J., & Montserrat, R. 2009. Innovación varietal en manzano. *Revista de Fruticultura*, 1, 13-25.
- Iglesias, I., Carbo, J., Nonany, J., Dalmau, R., Guanter, G., Montserrat, R., Moreno, A. y Pages, J. M. 2001. Principales cultivares de manzana en el ámbito nacional (y II). *Vida Rural* 8, 46-48.
- Iwuoha, C. I., & Kalu, F. A. 1995. Calcium oxalate and physico-chemical properties of cocoyam (*Colocasia esculenta* and *Xanthosoma sagittifolium*) tuber flours as affected by processing. *Food Chemistry*, 54(1), 61-66.
- Jackson, D. y J. Palmer. 1999. Pome fruits. In: Jackson, D.I. y N.E. Looney (eds.). Temperate and subtropical fruit production. 2a ed. CABI Publishing, Wallingford, UK. 189-202 pp.
- Jayakody, L., & Hoover, R. 2002. The effect of lintnerization on cereal starch granules. *Food Research International*, 35(7), 665-680.
- Jenkins, P. J., & Donald, A. M. 1997. The effect of acid hydrolysis on native starch granule structure. *Starch-Stärke*, 49(7-8), 262-267.
- Jovanovich, G., Zamponi, R. A., Lupano, C. E., & Anon, M. C. 1992. Effect of water content on the formation and dissociation of the amylose-lipid complex in wheat flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(10), 1789-1793.
- Jyothi, A. N., Sajeev, M. S., & Sreekumar, J. N. 2010. Hydrothermal modifications of tropical tuber starches. 1. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical, rheological and gelatinization characteristics. *Starch-Stärke*, 62(1), 28-40.
- Kaushal, N.K., Joshi, V.K. 1995. Preparation and evaluation of apple pomace cookies. *Indian Food Packer* 49, 17-25.
- Khlestkin, V. K., Peltek, S. E., & Kolchanov, N. A. 2018. Review of direct chemical and biochemical transformations of starch. *Carbohydrate Polymers*, 181, 460-476.
- Kim, W. W., & Yoo, B. 2009. Rheological behavior of acorn starch dispersions: effects of concentration and temperature. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(3), 503-509.
- Kittipongpatana, O. S., & Kittipongpatana, N. 2011. Preparation and physicochemical properties of modified jackfruit starches. *LWT-Food Science and Technology*, 44(8), 1766-1773.
- Lal Kaushal, B. B., & Sharma, P. C. 1995. Apple. *Food Science and Technology-New York-Marcel Dekker-*, 91.
- Lawal, O. S. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 37(5), 268-277.

- Lawal, O. S. 2004. Composition, physicochemical properties and retrogradation characteristics of native, oxidised, acetylated and acid-thinned new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *Food Chemistry*, 87(2), 205-218.
- Lawton, B.T., Henderson, G.A. and Derlatka, E.J. 1972. The effects of extruder variables on the gelatinization of corn starch. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 50, 168-172p.
- Li, H., Gidley, MJ, y Dhital, S. 2019. Almidones de alto contenido de amilosa para cerrar la “brecha de la fibra”: desarrollo, estructura y funcionalidad nutricional. *Revisiones completas en Ciencia de Alimentos e Inocuidad de Alimentos*, 18 (2), 362-379.
- Liu, H., Yu, L., Xie, F., & Chen, L. 2006. Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content. *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 357-363.
- Luby, J. 2003. Taxonomic classification and brief history. In: Ferree, D.C. e I.J. Warrington (eds.). Apples, botany, production and uses. CABI Publishing, Wallingford, UK. 1-14 pp.
- Martínez-Alvarado, C.D., Muñoz-Cano Ruíz, M. y Santoyo-Juárez, J.A. 2010. Paquete tecnológico para el establecimiento de malanga. Fundación produce Sinaloa, A.C.
- Mehboob, S., Ali, T. M., Alam, F., & Hasnain, A. 2015. Dual modification of native white sorghum (*Sorghum bicolor*) starch via acid hydrolysis and succinylation. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 459-467.
- Mendoza, J. G. S., Ricardo, M. A. C., & Medina, C. A. R. 2017. Lintnerización de almidones nativos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y ñame (*Dioscorea rotundata*). *Vitae*, 24(2), 55-67
- Meyer, F., & White, E. 1993. Alcohol and nutrients in relation to colon cancer in middle-aged adults. *American Journal of Epidemiology*, 138(4), 225-236.
- Montaldo, A. 1991. Cultivo de raíces y tubérculos tropicales. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Segunda edición Revista San José CR.407 p.
- Moorthy. S.N. 2004. Tropical sources of starch. In: A.C. Eliassion (Ed.). Starch in food: structure, function and applications. 321-359 pp.
- Moorthy, S. N. 2002. Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: a review. *Starch-Stärke*, 54(12), 559-592.
- Mua, J. P., & Jackson, D. S. 1998. Retrogradation and gel textural attributes of corn starch amylose and amylopectin fractions. *Journal of Cereal Science*, 27(2), 157-166.
- Mutungu, C., Rost, F., Onyango, C., Jaros, D. and Rohm, H. 2009. Crystallinity, thermal and morphological characteristics of resistant starch type III produced by hydrothermal treatment of debranched Cassava starch. *Starch/Stärke*. 61: 634–645.
- Neder-Suárez, D., Amaya-Guerra, C. A., Báez-González, J. G., Quintero-Ramos, A., Aguilar-Palazuelos, E., Galicia-García, T., & de Jesús Zazueta-Morales, J. 2018. Resistant Starch Formation from Corn Starch by Combining Acid Hydrolysis with Extrusion Cooking and Hydrothermal Storage. *Starch-Stärke*, 70(5-6), 1700118.
- Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Suda, I., Morishita, T., Ishiguro, K., & Yamakawa, O. 1998. Relationships between chain length distribution of amylopectin and gelatinization

- properties within the same botanical origin for sweet potato and buckwheat. *Carbohydrate Polymers*, 37(2), 153-158.
- Nugent, A. P. 2005. Health properties of resistant starch. *Nutrition Bulletin*, 30(1), 27-54.
- Nwokocha, L. M., Aviara, N. A., Senan, C., & Williams, P. A. 2009. A comparative study of some properties of cassava (*Manihot esculenta*, Crantz) and cocoyam (*Colocasia esculenta*, Linn) starches. *Carbohydrate Polymers*, 76(3), 362-367.
- Ozturk, S., Koksel, H., & Ng, P. K. 2011. Production of resistant starch from acid-modified amylotype starches with enhanced functional properties. *Journal of Food Engineering*, 103(2), 156-164.
- Owusu-Darko, P. G., Paterson, A., & Omenyo, E. L. 2014. Cocoyam (corms and cormels)—An underexploited food and feed resource. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 3(01), 22.
- Palomino, C., Molina, Y., & Pérez, E. 2010. Atributos físicos y composición química de harinas y almidones de los tubérculos de *Colocasia esculenta* (L.) Schott y *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott. *Revista de la Facultad de Agronomía (UCV)*, 36(2), 58-66.
- Panyoo, E. A., Njintang, N. Y., Hussain, R., Gaiani, C., Scher, J., & Mbofung, C. M. 2014. Physicochemical and Rheological Properties of Taro (*Colocasia esculenta*) Flour Affected by Cormels Weight and Method of Peeling. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1354-1363.
- Paredes-López, O., Bello-Pérez, L. A., & López, M. G. 1994. Amylopectin: structural, gelatinization and retrogradation studies. *Food Chemistry*, 50(4), 411-417.
- Pérez, E., Schultz, F. S., & de Delahaye, E. P. 2005. Characterization of some properties of starches isolated from *Xanthosoma sagittifolium* (tannia) and *Colocassia esculenta* (taro). *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 139-145.
- Pérez-Montes, I. J. 2008. Características de calidad en manzanas “Golden Delicious” y “Red Delicious” durante su maduración. Tesis de maestría. CIAD. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.
- Planchot, V., Colonna, P., Gallant, D. J., & Bouchet, B. 1995. Extensive degradation of native starch granules by alpha-amylase from *Aspergillus fumigatus*. *Journal of Cereal Science*, 21(2), 163-171.
- Pepe L.S., Morales J., Albano K.M., Telis V.R.N., Franco C.M.L. 2015. Effect of heat-moisture treatment on the structural, physicochemical, and rheological characteristics of arrowroot starch. *Food Science and Technology International*. 1-10.
- Polesi, L. F., & Sarmiento, S. B. S. 2011. Structural and physicochemical characterization of RS prepared using hydrolysis and heat treatments of chickpea starch. *Starch-Stärke*, 63(4), 226-235.
- Ramírez- Miranda M., Salgado- Cruz de la P., Calderón-Domínguez G. 2017. Cambios en la estructura del almidón jícama (*Pachyrhizus erosus*) durante el tratamiento térmico por simulación de horneado y su efecto en el índice glicémico. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 2. 256-261.

- Rivas-González, M., Méndez-Montecalvo, M. G. C., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, M. C., & Bello-Pérez, L. A. 2008. Morphological molecular and physicochemical characterization of oxidized and lintnerized banana starch. *Agrociencia*, 487-497.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. 2006. Resistant starch—a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(1), 1-17.
- Salas, N. A., Molina-Corral, F. J., González-Aguilar, G. A., Otero, A., Sepulveda, D. R., & Olivas, G. I. 2011. Volatile production by ‘Golden Delicious’ apples is affected by preharvest application of aminoethoxyvinylglycine. *Scientia Horticulturae*, 130(2), 436-444.
- Sánchez-Rivera, M. M., Almanza-Benítez, S., Bello-Pérez, L. A., Méndez Montecalvo, G., Núñez-Santiago, M. C., Rodríguez-Ambríz, S. L. y Gutierrez-Meráz, F. 2013. Acetylation of banana (*Musa paradisiaca* L.) and corn (*Zea mays* L.) starches using a microwave heating procedure and iodine as catalyst: II. Rheological and structural studies. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1256-1261.
- Santos, P. A., Cabrera J.M., Gómez K.R., López T.J., Rayas C.A., Basail P.M., Medero V.V., Beovides G.Y. 2011. Multiplicación en sistema de inmersión temporal del clon de malanga “viequera” (*Xanthosoma* Spp.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 8. 97-106.
- Saura-Calixto, F., Goñi, I., Bravo, L., & Mañas, E. 1993. Resistant starch in foods: modified method for dietary fiber residues. *Journal of Food Science*, 58(3), 642-643.
- Sefa-Dedeh, S., & Agyir-Sackey, E. K. 2004. Chemical composition and the effect of processing on oxalate content of cocoyam *Xanthosoma sagittifolium* and *Colocasia esculenta* cormels. *Food Chemistry*, 85(4), 479-487.
- Sevenou, O., Hill, S. E., Farhat, I. A., & Mitchell, J. R. 2002. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31(1-3), 79-85.
- Shah, A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Ashwar, B. 2018. Dual enzyme modified oat starch: Structural characterisation, rheological properties, and digestibility in simulated GI tract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 140-147.
- 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.
- Shi, M., & Gao, Q. 2016. Recrystallization and *in vitro* digestibility of wrinkled pea starch gel by temperature cycling. *Food Hydrocolloids*, 61, 712-719.
- Shi, M., Gu, F., Wu, J., Yu, S., & Gao, Q. 2013. Preparation, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of cross-linked resistant starch from pea starch. *Starch-Stärke*, 65(11-12), 947-953.
- Shin, M., Woo, K., & Seib, P. A. 2003. Hot-water solubilities and water sorption of resistant starches at 25° C. *Cereal Chemistry*, 80(5), 564-566.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Resumen Nacional. Intención de cosecha. México, D.F. Recuperado de:
http://infosiap.siap.gob.mx/opt/agricultura/intension/Intencion_cosechaPerenne_cultivo2018.pdf

- SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Malanga. México, D.F. Recuperado de:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/96275/Malanga_monografias.pdf
- SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Manzana. México, D.F. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap>
- SIAP. 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: Atlas Agroalimentario. México, D.F. Recuperado de:
http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016
- Simsek, S., & El, S. N. 2012. Production of resistant starch from taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) corm and determination of its effects on health by in vitro methods. *Carbohydrate Polymers*, 90(3), 1204-1209.
- Singh, S., Singh, N., Isono, N., & Noda, T. 2009. Relationship of granule size distribution and amylopectin structure with pasting, thermal, and retrogradation properties in wheat starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(2), 1180-1188.
- Singh, N., Inouchi, N., & Nishinari, K. 2005. Morphological, structural, thermal, and rheological characteristics of starches separated from apples of different cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(26), 10193-10199. (a)
- Singh, S., Raina, C. S., Bawa, A. S., & Saxena, D. C. 2005. Effect of heat-moisture treatment and acid modification on rheological, textural, and differential scanning calorimetry characteristics of sweet potato starch. *Journal of Food Science*, 70(6), e373-e378. (b)
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219-231.
- Siroha, A. K., & Sandhu, K. S. 2018. Physicochemical, rheological, morphological, and *in vitro* digestibility properties of cross-linked starch from pearl millet cultivars. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1371-1385.
- Sievert, D. 1989. Enzyme-resistant starch. I. Characterization and evaluation by enzymatic, thermoanalytical, and microscopic methods. *Cereal Chemistry*, 66, 342-347.
- Smits, A. L., Ruhнау, F. C., Vliegthart, J. F., & van Soest, J. J. 1998. Ageing of starch-based systems as observed with FT-IR and solid-state NMR spectroscopy. *Starch-Stärke*, 50(11-12), 478-483.
- Sozer, N., Dalgıç, A. C., & Kaya, A. 2007. Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 476-484.
- Srichuwong, S., Sunarti, T. C., Mishima, T., Isono, N., & Hisamatsu, M. 2005. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 60(4), 529-538.
- Steffe, J.F. 1992. Rheological methods in the food process engineering. Freeman press. Segunda edición. East Lansing. Michigan. 412 p.
- Stevenson, D. G., Domoto, P. A., & Jane, J. L. 2006. Structures and functional properties of apple (*Malus domestica* Borkh) fruit starch. *Carbohydrate Polymers*, 63(3), 432-441.

- Tecante, A., & Doublier, J. L. 1999. Steady flow and viscoelastic behavior of crosslinked waxy corn starch- κ -carrageenan pastes and gels. *Carbohydrate Polymers*, 40(3), 221-231.
- Tirado-Gallegos, J. M., Zamudio-Flores, P. B., Ornelas-Paz, J. D. J., Rios-Velasco, C., Acosta-Muñiz, C. H., Gutiérrez-Meraz, F., ... & Salgado-Delgado, R. 2016. Efecto del método de aislamiento y el estado de madurez en las propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas de almidón de manzana. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 391-408.
- Topping, D. L., Fukushima, M., & Bird, A. R. 2003. Resistant starch as a prebiotic and synbiotic: state of the art. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(1), 171-176.
- Topping, D. L., & Clifton, P. M. 2001. Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and non-starch polysaccharides. *Physiological Reviews*, 81(3), 1031-1064.
- Torres Becerril, M., Carmona García, R., & Aguirre Cruz, A. 2015. Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(4), 905-912.
- Torruco-Uco, J. G., Chávez-Murillo, C. E., Hernández-Centeno, F., Salgado-Delgado, R., Tirado-Gallegos, J. M., & Zamudio-Flores, P. B. 2016. Use of High-Performance Size-Exclusion Chromatography for Characterization of Amylose Isolated from Diverse Botanical Sources. *International Journal of Food Properties*, 19(6), 1362-1369.
- Van Hung, P., Vien, N. L., & Phi, N. T. L. 2016. Resistant starch improvement of rice starches under a combination of acid and heat-moisture treatments. *Food Chemistry*, 191, 67-73.
- Van Soest, J. J., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegenthart, J. F. 1995. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201-214p.
- Vargas, G., Martínez, P., & Velezmore, C. 2016. Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. *Scientia Agropecuaria*, 7(SPE), 223-230.
- Velázquez, O. C., Lederer, H. M., & Rombeau, J. L. 1996. Butyrate and the colonocyte. *Digestive Diseases and Sciences*, 41(4), 727-739.
- Wang Qi. and Cui, S. W. 2005. Understanding the Physical Properties of Food Polysaccharides. In, Cui, S. W. (Ed.). *Food Carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications*. CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, FL, USA. 418 pp.
- Wang, L., & Wang, Y. J. 2001. Structures and physicochemical properties of acid-thinned corn, potato and rice starches. *Starch-Stärke*, 53(11), 570-576.
- Waterschoot, J., Gomand, S. V., Fierens, E., & Delcour, J. A. 2015. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. *Starch-Stärke*, 67(1-2), 14-29.
- Westwood, M.N. 1993. *Temperate-zone pomology: Physiology and Culture*. Timber Press. Third Edition. Oregon, OR. 536 p.

- Xia, H., Li, B. Z., & Gao, Q. 2017. Effect of molecular weight of starch on the properties of cassava starch microspheres prepared in aqueous two-phase system. *Carbohydrate Polymers*, 177, 334-340.
- Xie, F., Yu, L., Su, B., Liu, P., Wang, J., Liu, H. y Chen, L. (2009). Propiedades reológicas de los almidones con diferentes relaciones amilosa / amilopectina. *Journal of Cereal Science*. 49 (3), 371-377.
- Xie, X. S., Liu, Q., & Cui, S. W. 2006. Studies on the granular structure of resistant starches (type 4) from normal, high amylose and waxy corn starch citrates. *Food Research International*, 39(3), 332-341.
- Xie, X.S., Liu, Q., Cui, S.W. 2005. Starch modification and applications. In: Cui, S. W (ed.). *Food Carbohydrates: Chemistry, physical properties and applications*. Press, Boca Raton, FL. 357-405.
- Yamaki, S. 1984. Isolation of vacuoles from immature apple fruit flesh and compartmentation of sugars, organic acids, phenolic compounds and amino acids. *Plant and Cell Physiology*, 25(1), 151-166.
- Ye, J., Liu, C., Luo, S., Hu, X., & McClements, D. J. 2018. Modification of the digestibility of extruded rice starch by enzyme treatment (β -amylolysis): An *in vitro* study. *Food Research International*, 111, 590-596.
- Zeng, F., Ma, F., Kong, F., Gao, Q., & Yu, S. 2015. Physicochemical properties and digestibility of hydrothermally treated waxy rice starch. *Food Chemistry*, 172, 92-98.
- Zeng, S., Wu, X., Lin, S., Zeng, H., Lu, X., Zhang, Y., & Zheng, B. 2015. Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods. *Food chemistry*, 186, 213-222.
- Zhang, Y., Liu, W., Liu, C., Luo, S., Li, T., Liu, Y., & Zuo, Y. 2014. Retrogradation behavior of high-amylose rice starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Food Chemistry*, 158, 255-261.
- Zamudio-Flores, P. B., Vargas-Torres, A., Pérez-González, J., Bosquez-Molina, E. and Bello-Pérez, L. A. 2006. Films prepared with oxidized banana starch: Mechanical and barrier properties. *Starch/Stärke*. 58(6), 274–282.
- Zamudio-Flores, P. B., Tirado-Gallegos, J. M., Monter-Miranda, J. G., Aparicio-Saguilán, A., Torruco-Uco, J. G., Salgado-Delgado, R., & Bello-Pérez, L. A. 2015. Digestibilidad *in vitro* y propiedades térmicas, morfológicas y funcionales de harinas y almidones de avenas de diferentes variedades. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(1), 81-97.