












## Cambios morfológicos y fisicoquímicos en almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado por pirodextrinización e hidrólisis enzimática

Maloy Hernández Hernández<sup>1</sup> , Jorge Luis Ble Castillo<sup>1</sup> , Isela Esther Juárez Rojop<sup>1</sup> ,  
Crystell Guadalupe Guzmán Priego<sup>1</sup> , Mirian Carolina Martínez López<sup>1</sup> , Luis Fernando Trujillo Castillo<sup>1</sup> ,  
Nury Hernández Díaz<sup>1</sup> , David Betancur Ancona<sup>2</sup> , Valentino Mukthar Sandoval Peraza<sup>3</sup> ,  
Patricia Quintana Owen<sup>4</sup> , Viridiana Olvera Hernández<sup>1</sup> .

**Resumen:** **Introduction:** las propiedades de los almidones varían significativamente entre fuentes y variedades de una misma especie. La modificación enzimática puede aumentar el contenido de almidón no digerible y fibra dietética, mejorando la solubilidad. En este contexto la maltodextrina enzimáticamente resistente (MER) se muestra como un ingrediente prometedor para aumentar el contenido de fibra dietética en una amplia gama de alimentos. **Objetivo:** evaluar los cambios en el contenido de almidón resistente y las propiedades fisicoquímicas del almidón aislado de yuca (*Manihot esculenta*) sometido a tratamientos de piroconversión e hidrólisis enzimática. **Materiales y métodos:** el almidón nativo fue modificado mediante pirodextrinización bajo diferentes relaciones almidón/ácido (80:1 y 160:1 p/v), temperaturas (90 y 110 °C) y tiempos de reacción (1 y 3h); seguido de maltodextrinización usando dos concentraciones de enzima (0,1 % y 0,05 %) y tiempos de reacción (10 y 30 min); posteriormente se determinó el contenido de almidón resistente (AR). **Resultados:** las pirodextrinas presentaron valores de AR entre 2,64 % a 24,42 %. En las MER el mayor valor fue de AR fue en el tratamiento 3 con 4,03 % ( $p < 0,05$ ). Los tratamientos cumplieron con los valores de equivalentes de dextrosas (ED) de una MER. **Conclusiones:** este estudio resalta la influencia significativa de la pirodextrinización y la hidrólisis enzimática en las propiedades del almidón nativo de *Manihot esculenta*. La pirodextrinización incrementó el contenido de almidón resistente, mientras que la hidrólisis enzimática redujo el AR y el almidón de digestión lenta. **Arch Latinoam Nutr 2026; 76(2): 70-78.**

**Palabras clave:** almidón resistente, maltodextrinización, pirodextrinización.

**Abstract:** **Morphological and physicochemical changes in cassava (*Manihot esculenta*) starch modified by pyrodextrinization and enzymatic hydrolysis** **Introduction:** The properties of starches vary significantly between sources and varieties of the same species. After enzymatic modification of starch, the content of indigestible starch and dietary fiber increases, as does its solubility, positioning enzyme-resistant maltodextrin (ERM) as a promising ingredient for increasing the dietary fiber content in a wide range of foods. **Objective:** To evaluate the changes in resistant starch content and the physicochemical characteristics of starch isolated from cassava (*Manihot esculenta*) subjected to pyroconversion and enzymatic hydrolysis treatments. **Materials and methods:** Native starch was modified by pyrodextrinization: starch/acid relation (80:1 and 160:1 w/v), reaction time (1 and 3 h), and temperature (90 and 110 °C); followed by maltodextrinization. Using two enzyme concentrations (0,1 % and 0.05 %) and reaction times (10 and 30 min), resistant starch (RS) content was subsequently determined. **Results:** Pyrodextrins showed RS values ranging from 2,64 % to 24,42 %. In the case of ERM, the highest RS values were recorded in treatment 3 ( $p < 0,05$ ) with 4,03 % RS. The treatments met the dextrose equivalent (DE) values of ERM. **Conclusions:** This study highlights the significant influence of pyrodextrinization and enzymatic hydrolysis on the properties of native *Manihot esculenta* starch. Pyrodextrinization increased the RS content, while enzymatic hydrolysis led to a decrease in both RS and slow-digesting starch. **Arch Latinoam Nutr 2026; 76(2): 70-78.**

**Keywords:** maltodextrinization, pyrodextrinization, resistant starch.

### Introducción

La fibra dietaria constituye un grupo heterogéneo de sustancias que tienen la propiedad de ser indigeribles en el intestino delgado y llegar al colon donde son parcialmente fermentadas (1). Dentro de estas sustancias destaca el almidón resistente (AR), también existe una fracción de almidón digerible llamada almidón de digestión lenta (ADL), que presenta efectos benéficos sobre el estado fisiológico tanto en humanos como en modelos animales (2, 3). El AR, ejerce un valioso

<sup>1</sup>División Académica de Ciencias de la Salud, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Gregorio Méndez 2838-A, Col. Tamulté, 86100 Villahermosa, Tabasco, México. <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Periférico Norte Kilómetro 33.5, Tablaje Catastral 13615, Col. Chuburná de Hidalgo Inn, 97203 Mérida, Yucatán, México. <sup>3</sup>Universidad Del Valle de México, Escuela de Ciencias de la Salud, Carretera Mérida-Progreso Km 9.5, Calle 79 No. 500, Col. Dzityá, 97302, Mérida, Yucatán, México. <sup>4</sup>Departamento de Física Aplicada. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Km. 6 Antigua carretera a Progreso Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México. Autor para la correspondencia: Viridiana Olvera Hernández, e-mail: viryolvera11@gmail.com



papel fundamental en la prevención y control de enfermedades crónicas, al mejorar la salud digestiva, el control glucémico, la sensibilidad a la insulina, los niveles de colesterol y favorecer la microbiota intestinal con lo cual se promueve la homeostasis intestinal, lo que impacta positivamente en la regulación metabólica e inflamatoria del organismo (4, 5). Estudios previos demostraron que un almidón nativo (AN) con un porcentaje de AR del 75 al 85 %, disminuyó en ratas obesas la grasa corporal, la presión arterial, los niveles de glucosa y los lípidos séricos; y en un grupo de sujetos con obesidad mejoró la insulino-resistencia (IR) y disminuyó el promedio de glucemia de 48 h estimada por monitoreo continuo (6, 7). Al ser el almidón uno de los biopolímeros naturales más abundantes y versátiles, se ha utilizado ampliamente en la industria alimentaria debido a su bajo costo, ser renovable, su alta biodegradabilidad y sus propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, hay AN que no presenta resistencia a la digestión, lo que representan desventajas físico-químicas, como retrogradación, alta viscosidad, poca estabilidad térmica, entre otras características que limitan su uso tanto en la industria alimentaria y la no alimentaria (8, 9). Para superar estas limitaciones, el AN puede someterse a procesos de modificaciones químicas, físicas y/o enzimáticas, permitiendo optimizar sus propiedades fisicoquímicas intrínsecas y sus características funcionales, con el fin de optimizar sus propiedades estructurales y funcionales para aplicaciones específicas, incluyendo su digestibilidad (10, 11). Una estrategia de modificación al almidón es la pirodextrinización, que al controlar condiciones de calor y un catalizador ácido provoca reacciones de transglucosilación y despolimerización, resultado la formación de enlaces atípicos que reducen su digestibilidad y alteran su estructura molecular (12, 13). La pirodextrinización permite producir fibras solubles con propiedades fisicoquímicas específicas, alta solubilidad, baja viscosidad y una estabilidad excepcional en condiciones ácidas y de alta temperatura (14). Las propiedades de los almidones varían significativamente entre diferentes fuentes y en variedades de una misma especie,

lo que influye en su funcionalidad y beneficios para la salud (15). Entre las fuentes más relevantes se encuentran los tubérculos, debido a su amplia disponibilidad y facilidad de extracción, al respecto, la yuca (*Manihot esculenta*) representa una materia prima estratégica por su alto rendimiento de almidón y sus propiedades fisicoquímicas favorables para modificaciones tecnológicas (16). Este tubérculo es altamente utilizado para fines culinarios o industriales debido al rendimiento del almidón y sus propiedades funcionales y fisicoquímicas (11). Modificar almidón nativo de yuca mediante piroconversión e hidrólisis enzimática podría ser una estrategia efectiva para producir maltodextrinas enzimáticamente resistentes (MER) con enlaces menos susceptibles a la digestión, alto contenido de fibra soluble y potencial prebiótico (17,18), esto permitiría la mejora de solubilidad, colocando a la MER como un ingrediente prometedor para incrementar el contenido de AR en una amplia gama de alimentos, especialmente en bebidas, productos lácteos, cremas y sopas, pues las tendencias del mercado muestran un aumento del uso en la industria para productos con bajo índice glucémico, en particular en las categorías de nutrición para diabéticos y control de peso (19, 20). El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios morfológicos y fisicoquímicos en almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado por pirodextrinización e hidrólisis enzimática.

## Materiales y métodos

### *Extracción de almidón nativo de yuca*

La yuca (*Manihot esculenta*) se adquirió en una plantación del municipio Jalpa de Méndez, Tabasco. El período de cosecha se realizó durante seis meses entre los meses agosto y febrero. Posteriormente, el trabajo experimental fue realizado durante los siguientes 18 meses. El AN de *M. esculenta* se extrajo de la siguiente manera (6): los rizomas fueron pelados, cortados en cubos de 3 cm y sumergidos por 30 min en solución de ácido cítrico (0,3 %) a un volumen doble de su peso (1:2 p/v), se trituraron en una licuadora industrial T-304 (International®) durante 4 min para reducir las partículas utilizando el agua de remojo. El material resultante se colocó en recipientes para ser lavado con una solución de ácido cítrico (0,3 %) en una relación 1:1 (v/v), fue filtrado (malla No. 100) y posteriormente se realizó un segundo lavado al sedimento con la solución de ácido cítrico al 0,3 % en una relación 1:1, finalmente la fibra retenida en el tamiz

se eliminó y el filtrado se dejó sedimentar a 5 °C durante 24 h. Después de eliminar el líquido por decantación, el sedimento fue secado en un horno de convección ED 115 (Binder) a 55 °C durante 24 h, posteriormente se trituró en un molinillo 80385 (Hamilton) hasta obtener un polvo y se tamizó (malla No. 100). El almidón se almacenó en recipientes de plástico con tapa de rosca hermética para su posterior uso.

#### *Modificaciones al almidón nativo*

La pirodextrinización se llevó a cabo mediante un diseño factorial 32 con cuatro réplicas del tratamiento central empleando relación almidón/ácido (80:1 y 160:1 p/v), tiempo de reacción (1 y 3h) y temperatura (90 y 110 °C). Se colocaron 15 g de almidón nativo (b. s.) en una caja Petri de 100 x 15 mm. Se adicionó a la muestra HCL 2,2 M con base a la relación establecida para cada tratamiento. El ácido se dispersó en el almidón y se dejó reaccionar por 16 h. Posteriormente, las cajas Petri se colocaron en un horno de convección ED 115 (Binder) a la temperatura y durante el tiempo correspondiente a las condiciones del tratamiento. Los almidones pirodextrinizados fueron tamizados (malla no. 100). La hidrólisis enzimática se realizó con el almidón obtenido en el mejor tratamiento de pirodextrinización. Para llevarla a cabo se empleó enzima  $\alpha$ -amilasa EC. 3.2.1.1 (Sigma A-3306, 4000 unidades/mL). Se utilizó un diseño factorial 22, con cuatro réplicas del tratamiento central. Los factores y niveles correspondientes fueron: concentración enzima-sustrato (0,1 y 0,05 %) y tiempo de reacción (10 y 30 min). Posterior a ambas modificaciones se llevó a cabo la determinación de AR y ADL (6).

#### *Determinación de almidón resistente y almidón de digestión lenta*

La determinación de AR y de ADL se realizó de acuerdo a la técnica descrita en el kit para análisis que provee Megazyme (*Megazyme® International Ireland*), el cual ha sido aceptado y avalado por los métodos oficiales de la AOAC *International* (2002.02) y la AACC *International* (32-40.01).

#### *Determinación de equivalentes de dextrosa*

Se pesó 1 g de cada MER obtenida, la muestra seca finamente molida y tamizada fue aforada a 100 mL en agua destilada. A 1 mL de esta solución, se le adicionó 1,5 mL de solución de ácido 3,5-Dinitrosalicílico (DNS), se mezcló y fue calentado en un baño a ebullición durante 15 min. Posterior a su enfriamiento, se procedió a la

lectura a 550 nm. La curva de calibración se realizó a partir de soluciones de glucosa (0,2 a 1,0 mg/mL) (14).

Evaluación de las propiedades morfológicas y funcionales a los productos obtenidos por pirodextrinización e hidrólisis enzimática

#### *Propiedades morfológicas*

Microscopía electrónica de barrido: Este análisis se realizó para determinar los cambios en tamaño, forma y estructura granular por efecto de los tratamientos. Se realizó en un microscopio electrónico (JEOL, JSM-7610F FESEM, EE. UU.) con resolución de 1 nm, ampliación de 500 X con micrografía de 10,3 mm, acelerador de voltaje de 5 kV y corriente de sonda de hasta 200 nA. Las muestras se colocaron sobre papel conductor de carbono y se metalizaron con una aleación de oro-platino durante 1 min con la ayuda de un revestidor giratorio (Quorum, Q150R ES, Reino Unido); posteriormente se analizaron en el microscopio electrónico para determinar los cambios de tamaño, forma y estructura granular por efecto de los tratamientos (8).

Difracción de rayos X y cristalinidad: La medición se llevó a cabo con un difractor (Bruker D8-Advance, USA) utilizando radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) a 40 kV y 30 mA, cada 0,02 °/s, los datos se recolectaron en un intervalo de 4 a 8 ° cada 0,1 °. La línea base del difractograma se corrigió en el intervalo de barrido y el vector se normalizó con el programa OPUS 3.0. (21).

#### *Propiedades funcionales*

Gelatinización, solubilidad y poder de hinchamiento: La temperatura de gelatinización se determinó mediante calorimetría diferencial de barrido. La temperatura inicial, pico, final y la entalpía de gelatinización se obtuvieron del termograma resultante (22).

## **Resultados**

Pirodextrinización de almidón nativo de Yuca *Manihot esculenta*

El contenido de AR y de ADL de los diferentes tratamientos de pirodextrinización a los cuales

fue sometido el almidón nativo de yuca *Manihot esculenta*, se presenta en la Tabla 1.

No mostraron cambios de color visibles y los valores más altos de AR se registraron en los tratamientos 1 y 2 ( $p < 0,05$ ).

*Modificación del almidón pirodextrinizado mediante hidrólisis enzimática*

De acuerdo al análisis de varianza de los datos obtenidos, los factores concentración de almidón-ácido, temperatura y tiempo de reacción, fueron significativos ( $p < 0,05$ ) para obtener la mayor concentración de AR (Tabla 2). Al no haber un tratamiento que haya registrado mayor contenido de AR, de acuerdo con el análisis de varianza, se eligió como mejor tratamiento al número 2, debido a que tuvo la tendencia de presentar mayor AR dentro de los tratamientos con equivalentes de dextrosa (ED) menores a 20. Siendo elegida la maltodextrina con 12,29 % de AR, 1,32 % de ADL y ED de 9,45 %, utilizando la condición con mayor concentración

de enzima y menor tiempo de reacción.

*Propiedades morfológicas*

En la figura 1a) se puede observar en la microscopia electrónica de barrido que los gránulos del almidón nativo de yuca *M. esculenta* presentan una forma esférica y oval y tienen un tamaño disperso, con diámetro entre 4,69 y 17,2  $\mu\text{m}$ . En el almidón pirodextrinizado (Figura 1b) se observaron gránulos con rupturas, probablemente causadas por el proceso de pirodextrinización, aunque también fueron observados gránulos resistentes al tratamiento, que preservaron su forma esférica y oval, con tamaño hasta de 20,8  $\mu\text{m}$ . Referente a la micrografía de la MER no fueron observados cambios aparentes (Figura 1c). Con respecto a la difracción de rayos X, el almidón en su forma nativa, mostró un patrón de DRX tipo C (Figura 2a), la pirodextrina mostro un patrón de DRX no cristalino sin cambio aparente (Figura 2b). El patrón de DRX de la MER (Figura 2c), presentó un patrón menos definido con un pico más fuerte en el ángulo  $17^\circ$  sin más presencia de picos, evidenciando ausencia de estructuras granulares claras. La cristalinidad para el AN fue de 41,5 %, posterior al proceso de pirodextrinización disminuyó 5,7 % (35,8 %).

**Tabla 1.** Factores y niveles en la pirodextrinización de almidón nativo de Yuca (*Manihot esculenta*)

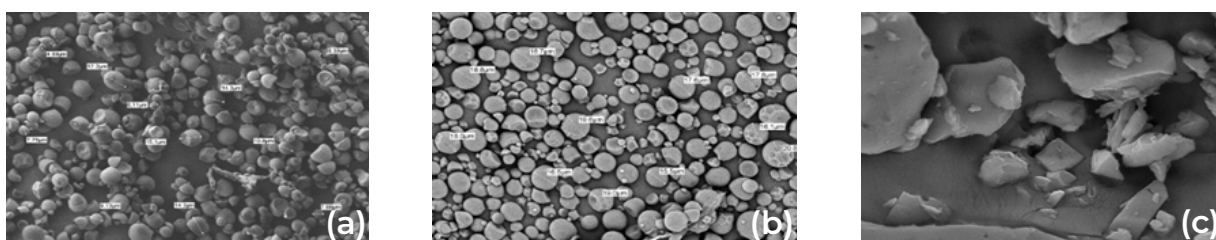
Tratamiento	Almidón/ácido (HCl)	Temperatura	Tiempo de reacción	AR	ADL
		(°C)	(h)	(%)	(%)
1	80 a 1	90	1	24,12 <sup>a</sup>	34,30 <sup>ab</sup>
2	80 a 1	110	1	24,42 <sup>a</sup>	33,60 <sup>ab</sup>
3	160 a 1	90	1	2,64 <sup>ab</sup>	35,10 <sup>b</sup>
4	160 a 1	110	1	21,81 <sup>b</sup>	31,84 <sup>ab</sup>
5	80 a 1	90	3	21,82 <sup>b</sup>	38,25 <sup>bc</sup>
6	80 a 1	110	3	18,46 <sup>c</sup>	26,35 <sup>a</sup>
7	160 a 1	90	3	16,43 <sup>d</sup>	32,51 <sup>ab</sup>
8	160 a 1	110	3	16,02 <sup>d</sup>	44,56 <sup>c</sup>
9	120 a 1	100	2	21,02 <sup>be</sup>	36,28 <sup>b</sup>
10	120 a 1	100	2	21,52 <sup>be</sup>	37,41 <sup>b</sup>
11	120 a 1	100	2	21,50 <sup>be</sup>	37,70 <sup>b</sup>
12	120 a 1	100	2	22,03 <sup>be</sup>	34,40 <sup>b</sup>
Nativo				14,52	51,12

AR: almidón resistente, ADL: almidón de digestión lenta, <sup>a-d</sup> Diferentes letras en la misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ). Los tratamientos 9–12 corresponden a los puntos centrales. Se realizaron 4 repeticiones para cada ensayo, donde s de AR =  $\pm 0.41$  y s de ADL =  $\pm 1.49$ ; n = 4.

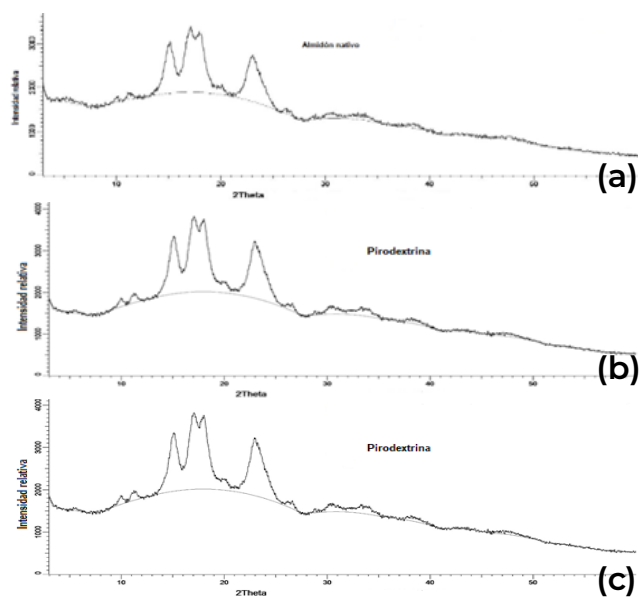
**Tabla 2.** Factores y niveles en la hidrólisis enzimática de almidón pirodextrinizado de Yuca (*Manihot esculenta*)

Tratamiento	Enzima $\alpha$ -amilasa (v/v) (%)	Tiempo de reacción (min)	AR %	ADL %	ED %
12 g en 60 mL					
1	0,05	10	12,06 <sup>a</sup>	1,28	9,07 <sup>a</sup>
2	0,1	10	12,29 <sup>a</sup>	1,32	9,45 <sup>a</sup>
3	0,05	30	12,25 <sup>a</sup>	1,08	21,09 <sup>b</sup>
4	0,1	30	12,13 <sup>a</sup>	5,59	22,98 <sup>b</sup>
5	0,075	20	12,57 <sup>a</sup>	3,96	21,84 <sup>b</sup>
6	0,075	20	12,34 <sup>a</sup>	3,70	21,92 <sup>b</sup>
7	0,075	20	12,77 <sup>a</sup>	2,21	21,92 <sup>b</sup>
8	0,075	20	12,02 <sup>a</sup>	3,25	21,02 <sup>c</sup>
Pirodextrina			24,42	33,60	

AR: almidón resistente, ADL: almidón de digestión lenta, ED: equivalentes de dextrosa. <sup>a-c</sup>Diferentes letras en la misma columna indican diferencia significativa ( $p < 0,05$ ). Los tratamientos 5–8 corresponden a los puntos centrales. Se realizaron 4 repeticiones para cada ensayo, donde s de AR =  $\pm 0,32$ , s de ADL =  $\pm 0,77$  y s de ED = 0,43; n = 4.



**Figura 1.** Microscopía electrónica de barrido de los gránulos del (a) almidón nativo de yuca *M. esculenta*, (b) pirodextrina y (c) maltodextrina enzimáticamente resistente.



**Figura 2.** Patrón de difracción de Rayos X de los gránulos del (a) almidón nativo de yuca *M. esculenta*, (b) pirodextrina y (c) maltodextrina enzimáticamente resistente.

### Propiedades funcionales

El AN de *M. esculenta* registró una entalpía de gelatinización de 1,32 J/g y las temperaturas de gelatinización de 62,09 °C (inicial), 64,56 °C (pico) y 70 °C (final). En la pirodextrina, la entalpía de gelatinización fue de 0,96 J/g y las temperaturas de gelatinización fueron 62,04 °C (inicial), 65,07 °C (pico) y 70 °C (final). Y en la MER, la entalpía de gelatinización fue de 0,35 J/g, en cuanto a la temperatura inicial fue de 79,07 °C, pico 80,48 °C y final de 83,75 °C aproximadamente, observando pérdida en las unidades de entalpía, en comparación al AN y la pirodextrina. La mayor solubilidad en la pirodextrina (12,76 %) fue a los 90 °C, sin embargo, no representó una diferencia en comparación al almidón nativo (10 %), no así para la MER donde se observa el valor máximo de solubilidad (35 %) a los 90 °C. Con respecto al poder de hinchamiento de los productos obtenidos se observó incremento en la pirodextrina de yuca, en comparación con el AN. Lo que concuerda con la resistencia de los gránulos a la hidrólisis ácida total en la pirodextrinización, ya que fue posible la producción de geles, los cuales son más deformables que los geles obtenidos de gránulos con menor poder de hinchamiento. El poder de hinchamiento y la capacidad de absorción de agua están íntimamente ligados.

### Discusión

Si bien, los efectos benéficos por consumo del AR tales como la prevención y control de enfermedades crónicas, el mejoramiento de la salud digestiva, el control glucémico, la sensibilidad a la insulina, la disminución de los niveles de colesterol y el mejoramiento de la microbiota intestinal, dependen en gran medida de las diversas fuentes y especies utilizadas para la extracción del almidón en su fuente nativa y su posterior modificación (23). Los tubérculos son fuentes potenciales para extraerlo, tal es el caso de la Yuca *Manihot esculenta*, un alimento típico de la región sureste de México. Este estudio analizó los efectos de la pirodextrinización y la hidrólisis enzimática del almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta*). Tras la pirodextrinización, se observó un aumento del 10 % en el contenido de AR, atribuido

a la presencia de enlaces atípicos, los cuales se forman mediante la hidrólisis ácida produciendo fragmentos de residuos de glucosa más pequeños que al recombinarse mediante reacciones de transglucosilación, se reorganizan dando lugar a nuevos enlaces glucosídicos menos comunes. Estas estructuras reconfiguradas presentan mayor resistencia a la acción de las enzimas digestivas, favoreciendo así el incremento en el contenido de almidón resistente AR (6). Este comportamiento es consistente con lo reportado por otras investigaciones donde se observó incremento de almidón indigerible, bajo condiciones similares (110 °C, 1 h, relación 160:1). No obstante, las diferencias observadas en relación almidón/ ácido respecto al presente estudio pueden explicar las variaciones en la cantidad de AR obtenido (14).

Sin embargo, durante la hidrólisis enzimática, se observó una disminución en el AR y el ADL, lo que sugiere una mayor proporción aún presente de almidón de digestión rápida, probablemente debido a la modificación estructural de enlaces atípicos por el incremento de temperatura. Es sugerido que en los intentos de producir fracciones de ADL y AR en almidones modificados, las estructuras de doble hélice podrían romperse; observando un aumento o descenso en la producción de AR y ADL 24 y 25 (24-25).

Por otro lado, el patrón de DRX del almidón nativo y la pirodextrina de *M. esculenta*, mostró un patrón no cristalino, similar a un tipo de maltodextrina comercial de yuca antes reportado (16), esto se podría explicarse por la formación de una estructura mayormente amorfa, debido a la escasa generación de enlaces atípicos y a una baja compactación molecular; no obstante, la DRX evidencia picos débiles que indican la presencia de regiones parcialmente ordenadas.

Además, la entalpía de gelatinización fue menor en la pirodextrina, lo que indica que este material requirió menos energía para gelatinizarse debido a que el tratamiento térmico provocó modificaciones parciales en sus regiones cristalinas, debilitando parte de su estructura organizada. Sin embargo, dichas estructuras no fueron completamente destruidas, ya que aún conservaron cierto grado de orden. En el caso del AN, se registró una entalpía de gelatinización similar a la reportada para el almidón de yuca, indicando que mantiene las características estructurales típicas de este tipo de almidón sin modificaciones importantes (26).

Debido a la temperatura no es factible incluir este AN en productos sometidos a altas temperaturas; este estudio sugiere que no se presentó una ruptura en las dobles hélices de la región cristalina, sin embargo, las regiones amorfas tal vez fueron afectadas, lo que bastó para observar el aumento en el contenido de AR. Sin embargo, en la MER, la pérdida en los valores de entalpia de gelatinización y los valores similares de temperatura presentados durante la determinación de gelatinización, podría reflejar la pérdida en la cristalinidad lo que pudo haber influido en la reducción de AR. La disminución de la cristalinidad se asocia con una menor estabilidad térmica y mayor accesibilidad enzimática. Estos resultados evidencian que la ruptura parcial de las estructuras ordenadas puede favorecer o reducir la formación de AR dependiendo del grado de reorganización molecular (27).

En términos funcionales, la solubilidad del almidón aumentó tras los tratamientos, indicando una posible desintegración estructural. El aumento en la solubilidad del almidón posterior a los procesos de modificación química y enzimática; se debe a la posible desintegración estructural, a partir de la cual, se debilitan los gránulos de almidón, aumentando los lixiviados reflejándose en un producto más soluble.

El poder de hinchamiento también se incrementó con la pirodextrinización, pero disminuyó con la hidrólisis enzimática, lo que concuerda con lo reportado en MER de yuca reflejando la relación entre la porosidad de los gránulos y su capacidad de absorción de agua (14, 27-30). Estos resultados sugieren que los procesos de modificación afectan las propiedades funcionales del almidón, lo que tiene implicaciones para su uso en alimentos. Ha sido reportado mayor contenido de almidón indigerible posterior al tratamiento por pirodextrinización en yuca, empleando concentración de almidón/ácido 160:1, temperatura 110 °C y tiempo de reacción 1 h. Difiriendo en la relación almidón/ácido reportado en este estudio, probablemente debido a la técnica empleada para el análisis de AR (19).

Entre las limitaciones de este estudio se encuentran la ausencia de caracterización molecular sobre los enlaces glucosídicos formados.

### Conclusiones

Este estudio resalta la influencia significativa de la pirodextrinización y la hidrólisis enzimática en las propiedades del almidón nativo de yuca (*Manihot*

*esculenta*). La pirodextrinización incrementó el contenido de AR, sugiriendo la formación de enlaces atípicos, mientras que la hidrólisis enzimática condujo a una disminución del AR y del ADL, favoreciendo un almidón de digestión rápida. Estos cambios estructurales fueron corroborados por los análisis de DRX, que mostraron un patrón menos cristalino en la pirodextrina, indicando una alteración en la cristalinidad del almidón.

Además, el aumento en la solubilidad y el poder de hinchamiento tras la pirodextrinización, junto con la disminución observada en la hidrólisis enzimática, evidencian cómo estas modificaciones afectan las propiedades funcionales del almidón. Estos resultados son relevantes para la industria alimentaria, ya que ofrecen nuevas perspectivas sobre la utilización del almidón de yuca y sus derivados en productos alimentarios, especialmente en formulaciones que requieran características específicas de digestibilidad y funcionalidad.

### Agradecimientos

Al Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales y al Laboratorio de Difracción de Rayos X del Cinvestav, Mérida, Yucatán, México.

### Conflictos de intereses

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses.

### Contribución de los autores

- Maloy Hernández Hernández: Estudiante de posgrado y responsable de la ejecución del proyecto.
- Jorge Luis Ble Castillo y Viridiana Olvera Hernández: directores principales del proyecto.
- Isela Esther Juárez Rojop, Crystell Guadalupe Guzmán Priego, Mirian Carolina Martínez López, Nury Hernández Díaz y Patricia Quintana Owen: Determinaciones de muestras.

- Luis Fernando Trujillo Castillo, David Betancur Ancona, Valentino Mukthar Sandoval Peraza: Asesores de estadística en el proyecto.

### Referencias

1. Baptista NT, Dessalles R, Illner AK, Ville P, Ribet L, Anton PM, Durand-Dubief, M. Harnessing the power of resistant starch: A narrative review of its health impact and processing challenges *Front. Nutr.* 2024; 11: 1369950: <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1369950>
2. Arp C, Correa M, Ferrero C. Resistant starches: A smart alternative for the development of functional bread and other starch-based foods. *Food Hydrocoll.* 2021; 121:106949: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106949>
3. Wang Z, Wang S, Xu Q, Kong Q, Li F, Lu L. *et al.* Synthesis and functions of resistant starch. *Adv. Nutr.* 2023; 14: 1131-1144. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.06.001>
4. Daley SF, Shreenath AP. The Role of Dietary Fiber in Health Promotion and Disease Prevention: A Practical Guide for Clinicians. En: StatPearls Publishing. StatPearls Editorial Board; 2025. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559033>
5. Chen Z, Liang N., Zhang H., Li, H., Guo, J., Zhang, Y., Chen, Y., Wang, Y., Shi, N. Resistant starch and the gut microbiome: Exploring beneficial interactions and dietary impacts. *Food Chem X* 2024; 21: 101118. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101118>
6. Ble JL, Aparicio MA, Francisco MU, Córdova R, Rodríguez A, Méndez JD, *et al.* Effects of Native Banana Starch Supplementation on Body Weight and Insulin Sensitivity in Obese Type 2 Diabetics. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2010; 7 (5): 1953-1962: <https://doi.org/10.3390/ijerph7051953>
7. Arias Y, Ble JL, García C, Olvera V, Ramos M, Navarrete-Cortes A, Pérez-Hernández N, Méndez JD. Resistant starch consumption effects on glycemic control and glycemic variability in patients with type 2 diabetes: A randomized crossover study. *Nutrients* 2021; 13(11): 4052. <https://doi.org/10.3390/nu13114052>
8. López-Vázquez DE, Hernández-Rodríguez L, Lobato-Calleros C, Aguirre-Mandujano E. Effect of OSA modification of cacahuacintle corn starch on its physicochemical properties, digestibility and stability. *Ing. Agríc. Biosist.* 2024; 16 (2): 21-38. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2024.06.020>
9. Puri A, Mohite P, Ramole A, Verma S, Kamble M, Ranch K. Torneos. Starch science advancement: Isolation techniques, modification strategies, and multifaceted applications. *Macromol* 2025; 5(3): 40. <https://doi.org/10.3390/macromol5030040>
10. Xie Q, Fan B, Tao R, Wang F, Sun Y. A Comprehensive Review of Starch: Structure, Properties, Chemical Modification, and Application in Food Preservation. *Food Front.* 2025; 6(4):1645-57. <https://doi.org/10.1002/fft2.70040>
11. Cornejo F, Maldonado-Alvarado P, Palacios-Ponce S, Hugo D, Rosell CM. Impact of Cassava Starch Varieties on the Physicochemical Change during Enzymatic Hydrolysis. *Mol.* 2022; 27(18):6098: <https://doi.org/10.3390/molecules27186098>
12. De Souza Oliveira E, Lovera M, Machado AAC, Sampaio LMF, Miranda KWE, Silva ARAE, *et al.* Physicochemical and structural changes of cassava starch modified by pyrodextrinization with glacial acetic acid as catalyst. *Biocatal Agric Biotechnol* 2025; 69:103764: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103764>
13. Pattarapanawan M, Phuengjayaem S, Akrimajirachote N, Kotatha D. Partial enhancement of soluble fiber through pyrodextrinization of the residual starch in cassava pulp: Developing a novel dietary fiber with modified functional and improved prebiotic properties. *Food Res. Int.* 2025; 217:116747: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116747>
14. Toraya-Avilés R, Segura-Campos M, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D. Effects of pyroconversion and enzymatic hydrolysis on indigestible starch content and physicochemical properties of cassava (*Manihot esculenta*) starch. *Starch/Stärke.* 2017; 69 (5-6):1600267: <https://doi.org/10.1002/star.201600267>
15. Chen X, Hou Y, Wang Z, Liao A, Pan L, Zhang M, *et al.* A Comparative Study of Resistant Dextrins and Resistant Maltodextrins from Different Tuber Crop Starches. *Polymers.* 2023; 15(23):4545: <https://doi.org/10.3390/polym15234545>
16. Chamorro AF, Palencia M, Lerma TA. Physicochemical Characterization and Properties of Cassava Starch: A Review. *Polymers.* 2025; 17(12):1663: <https://doi.org/10.3390/polym17121663>
17. Hayati SR, Pattarapanawan M, Phuengjayaem S, Akrimajirachote N, Laohakunjit N, Kovitvadi A, *et al.* Preparation, characterization, and prebiotic potential of resistant maltodextrin from the remaining starch in cassava pulp. *Int. J. Biol. Macromol.* 2025; 297:139894: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139894>
18. Zhang X, Leemhuis H, Van Der Maarel MJEC. Digestion kinetics of low, intermediate and highly branched maltodextrins produced from gelatinized starches with various microbial glycogen branching enzymes. *Carbohydr. Polym.* 2020; 247: 116729: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116729>
19. Reseach report. Resistant Maltodextrin Market Overview: <https://www.360researchreports.com/market-reports/resistant-maltodextrin-market-207872>
20. Barbosa-Martín E, Sauri-Duch E, Chel-Guerrero L, Cuevas-Glory L, Moo-Huchin V, Betancur-Ancona D. Synthesis of pyrodextrins and enzymatically resistant maltodextrins from makal (*Xanthosoma yucatenensis*) Starch. *Food Technol Biotechnol* 2024; 62(1): 26-34. <https://doi.org/10.17113/ftb.62.01.24.8163>
21. Ottenhof M, Farhat I. The effect of gluten on the retrogradation of wheat starch. *J. Cereal Sci.* 2004; 40 (3): 269-274: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.07.002>
22. Cornejo-Ramírez YI, Martínez-Cruz O, Del Toro-Sánchez CL, Wong-Corral FJ, Borboa-Flores J, Cinco-Moroyoqui FJ. The structural characteristics of starches and their functional properties. *CyTA J Food* 2018; 16(1), 1003-1017. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1518343>

23. Niu Y, Wang L, Gong H, Jia S, Guan Q, Li Y, Cheng H. Nutrition and gut health: Preparation and efficacy of resistant starch. *Foods* 2025;14(3): 471. <https://doi.org/10.3390/foods14030471>
24. Iuga M, y Mironeasa, S. A review of the hydrothermal treatments impact on starch based systems properties. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2020; 60(22): 3890-3915.
25. Farooq MA., Yu J. Recent advances in physical processing techniques to enhance the resistant starch content in foods: A Review. *Foods*, 2024; 13(17): 2770. <https://doi.org/10.3390/foods13172770>
26. Dome K, Podgorbunskikh E, Bychkov A, Lomovsky O. Changes in the Crystallinity Degree of Starch Having Different Types of Crystal Structure after Mechanical Pretreatment. *Polymers* 2020; 12 (3): 641. <https://doi.org/10.3390/polym12030641>
27. Zou J, Li Y, Wang F, Su X, Li Q. Relationship between structure and functional properties of starch from different cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and yam (*Dioscorea opposita* Thunb) cultivars used for food and industrial processing. *LWT* 2023; 173, 114261. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114261>
28. Jia X, Li C, Wang Y, Zhang H, Zhang X, Zhou Y, et al. Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications. *Trends Food Sci. Technol*: 2023; 142:104-243. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104321>
29. Hartati N, Rahman N, Ajie FT, Hartati NS. Variation of cassava genotypes based on physicochemical properties of starches and resistant starch content. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 439:012048: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/439/1/012048>

Recibido: 20/03/2026  
Aceptado: 23/04/2026