

(03-010) - Granulometry and functional properties of cassava flour (*Yucca decipiens* Trel) for agroindustrial purposes

Martínez Betancourt, Selena Del Rocío ¹; Cadena Iñiguez, Jorge ²; Loera Alvarado, Gerardo ¹; López Padilla, Concepcion ³; Soto Hernandez, Ramón Marcos ¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, ² COLEGIO DE POSTGRADUADOS, ³ Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Coordinación Académica Región Altiplano Oeste de la Carretera Salinas-Santo Domingo

Desert yuca (*Yucca decipiens* Trel) native to the Mexican semi-desert registers empirical medicinal uses, therefore, flour from leaves and stems was evaluated for agroindustrial-medicinal purposes (food, beer and mezcal), characterizing them based on their granulometry, rheology, texture and functional properties analyzed with RStudio. The results indicate that the flours have a water absorption capacity comparable to wheat flour, and the oil absorption is half, indicating hydrophilic behavior similar to wheat and a lower oil requirement for formulations. The expansion capacity is similar to wheat flour, revealing the presence of gluten, which supports suitability for agroindustrial (food) applications that require this structural component. The flours showed notable foaming, high stability, and low lipid content, which is relevant for foods that require foaming properties. The fermentation coincided with parameters of method 56-60 of the A.A.C.C., classifying its mass as equivalent to weak soft wheat, supporting its applicability in fermentation processes. The internal friction values (0.85-0.92) suggest limited flow, but its high density indicates fine granulometry that facilitates packaging, handling, and storage, meeting Mexican regulatory requirements, allowing it to be integrated into combinations intended for food fortification.

Keywords: "Local resource"; "Particles"; "Granulometry"; "Texture"; "Goo"

Granulometría y propiedades funcionales de la harina de yuca (*Yucca decipiens* Trel) con fines agroindustriales

La yuca desértica (*Yucca decipiens* Trel) originaria del semidesierto mexicano registra usos medicinales empíricos, por tanto, se evaluó harina de hojas y tallos con fines agroindustrial-medicinal (alimentos, cerveza y mezcal), caracterizándolas con base en su granulometría, reología, textura y propiedades funcionales analizados con RStudio. Los resultados señalan que las harinas tienen capacidad de absorción de agua comparable a la harina de trigo, y la absorción de aceite es a la mitad, indicando comportamiento hidrofílico similar al trigo y menor requerimiento de aceite para formulaciones. La capacidad de expansión es similar a la harina de trigo, revelando presencia de gluten, lo cual respalda idoneidad para aplicaciones agroindustriales (alimentarias) que requieren este componente estructural. Las harinas mostraron notable formación de espuma, alta estabilidad y bajo contenido de lípidos, lo cual es relevante para alimentos que requieren propiedades espumantes. La fermentación coincidió con parámetros del método 56-60 de la A.A.C.C., clasificando su masa como equivalente a trigos suaves tipo débil, respaldando su aplicabilidad en procesos de fermentación. Los valores de fricción interna (0.85-0.92) sugieren flujo limitado, pero su alta densidad indica granulometría fina que facilita envasar, manipular y almacenar, cumpliendo requisitos normativos mexicanos, permitiendo integrarla a combinaciones destinadas a enriquecimiento de alimentos.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: “Recurso local”; “Partículas”; “Granulometría”; “Textura”; “Viscosidad”

Correspondencia: JORGE CADENA IÑIGUEZ jocadena@gmail.com

Agradecimientos: Agricultores del área semidesértica de San Luis Potosí y Zacatecas, México por el acceso a muestras vegetales

1. Introducción

El género *Yucca* (*Yucca* L.) está constituido por cerca de 50 especies de plantas suculentas, que incluyen perennes, arbustos y árboles, siendo miembros de la familia Agavaceae y originarias de Norteamérica y Centroamérica (Hochstätter, 2004). En México, se encuentran alrededor de 30 especies, de las cuales el 53 % son endémicas de este país (García-Mendoza, 2004).

Las yucas han sido tradicionalmente aprovechadas por diversas civilizaciones debido a las características únicas de cada especie, lo que ha permitido su versatilidad en la producción de alimentos, cosméticos y medicamentos (Patel, 2012). En las culturas indígenas de Norteamérica, las fibras de las hojas de yuca han sido esenciales en la confección de cuerdas, canastas y prendas, evidenciadas por restos hallados en yacimientos arqueológicos en Arizona que datan de más de dos mil años (Pearlstein, 2008). Además, su uso medicinal ancestral ha sido registrado como tratamiento para enfermedades (Efferth, 2007). Las yucas también son consideradas potenciales fuentes de saponinas y contienen polifenoles reconocidos por sus beneficios, caracterizados por su estructura química particular (Jiménez et al., 2021).

No obstante, en la región del altiplano entre San Luis Potosí y Zacatecas, las yucas carecen de aplicaciones significativas, siendo su fruto el único elemento consumido en algunos batidos, mermeladas y dulces. Esta situación se atribuye, en parte, a que ciertas especies como: *Y. endlichiana*, *Y. grandiflora*, *Y. Lacandonica* y *Y. Queretaroensis* están clasificadas como 'sujetas a protección especial' según la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

Una alternativa para el aprovechamiento de esta especie es la elaboración de harinas para su posible incorporación a productos comerciales. Sin embargo, se desconocen las propiedades multidimensionales de la harina de estas especies, las cuales juegan un papel clave al predecir la textura de los productos finales, evitando posibles defectos que afecten la calidad del producto. Este estudio caracterizó las propiedades multidimensionales de las harinas del tallo y hojas de *Yucca decipiens* para su posible incorporación en productos comerciales, con el fin de desarrollar nuevos materiales y productos dentro del ámbito de la ingeniería de producto, procesos y diseño industrial. La caracterización de estas harinas permitirá evaluar su viabilidad y desempeño en la producción de alimentos y una amplia gama de biomateriales naturales, contribuyendo a la innovación y diseño que promueven la sostenibilidad.

2. Materiales y métodos

Para realizar la presente investigación se utilizaron hojas y tallos de yuca (*Yucca decipiens* L.), las cuales fueron colectadas al azar de una parcela en Loma de la carreta, Zacatecas., (22°37.9190'N y 101°52.7990'O), durante el mes de mayo del año 2023.

2.1 Propiedades físicas

• Secado

Las hojas fueron desprendidas del tallo de forma manual y posteriormente el tallo fue rebanado en piezas de 3 cm de espesor. Las muestras fueron secadas en un horno a 30 °C (FELISA® TE-HV30D). 750 g de cada uno de los órganos fueron colocados y distribuidos uniformemente sobre charolas de aluminio, previamente lavadas y llevadas a peso constante

durante 1 h a 105 °C. Las muestras de los órganos fueron pesadas en una balanza granataria (Torrey) cada 24 h hasta llegar a peso constante (AOAC, 2005).

- **Molienda**

Las hojas y tallos secos fueron sometidas a un proceso de molienda en un molino coloidal a escala de laboratorio (Thomas Scientific®, modelo Wiley Mini-Mill 3383-L10, 115 V, 60 HZ, EE. UU), de dos cuchillas estacionarias y un rotor con cuatro filos, con la finalidad de obtener harinas con un tamaño de partícula uniforme menor a 0.300 mm.

- **Análisis granulométrico**

El tamizado de las harinas fue realizado de acuerdo con el método 965.22 de la A.O.A.C. (1997), con ayuda de un agitador (Ro-Tap®, W. S. Tyler™, EE. UU). Para ello, 200 g de cada harina e individualmente fueron colocados en un juego de tamices (Alcón®, México) (No. de mallas 50, 70, 80, 100, 150, 200, 250 y 400) y agitados durante 5 min. Finalmente, las fracciones de harinas retenidas en cada tamiz fueron pesadas.

- **Índice del tamaño de partícula**

El índice del tamaño de partícula fue determinado de acuerdo con el método reportado por Bedolla y Rooney (1984), con la siguiente fórmula:

$$ITP = \sum [(FN_0M_i) (\%DTP_i) + \dots + (FN_0M_n) (\%DTP_n)] \quad (1)$$

donde: ITP = Índice del tamaño de partícula; FN₀M = Factor de número de malla; DTP = Distribución del tamaño de partícula (%). Cada factor utilizado depende del número de la serie de tamices U.S. (el factor 0.2 para la malla No. 20; 0.4 malla No. 40; 0.6 malla No. 60; 0.8 malla No. 80; 1.0 malla No. 100 y fondo) y el % de retención de cada malla fue obtenido como se menciona en el análisis de distribución del tamaño de partícula.

- **Dimensiones de partículas**

Las dimensiones de las partículas de harinas fueron medidas mediante análisis de imágenes digitales, para ello la medición del tamaño de partícula se realizó por medio de la técnica de Observación Directa por microscopía óptica (OM) que permite la visualización directa de las partículas y su medición con un microscopio (MUSTOOL®) con cámara de 1200x (microscopio Digital MT315 de siete pulgadas con lente Dual, HD, China). Las variables morfológicas se midieron mediante la delimitación manual de la partícula en la imagen digital con el software ImageJ (64-bit versión ImageJ 1.5.4) de libre distribución.

2.2 Propiedades funcionales

- **Absorción de agua**

Fue determinada según método descrito por Beuchat (1977). En un tubo de centrífuga se colocó 1.0 g de harina y se le añadieron 10 mL de agua; después se agitó en un vortex durante 30 s. Posteriormente se centrifugó a 2500 rpm por 10 min, se eliminó el sobrenadante, la diferencia entre la masa de la muestra antes y después de absorber el agua, se consideró como la cantidad de agua absorbida. La capacidad de absorción de agua se determinó dividiendo la cantidad de agua retenida por la cantidad de muestra, expresada como sólidos.

- **Absorción de aceite**

Fue determinada de acuerdo con el método descrito por Beuchat (1977) con las siguientes modificaciones: en un tubo de centrífuga se colocó 1.0 g de harina, se le añadieron 10 mL de aceite de soya comercial, se agitó por vortex a 20 °C durante 30 s. Posteriormente, se centrifugó a 2500 rpm por 10 min, se eliminó el sobrenadante y la diferencia entre la masa de la muestra antes y después de absorber el aceite, se cuantificó como la cantidad de aceite absorbido. La capacidad de absorción de aceite se determinó dividiendo la cantidad de aceite retenido por la cantidad de muestra, expresada como sólidos.

- **Capacidad de hinchamiento**

Fue determinado siguiendo la metodología de Robertson *et al.* (2000) con las siguientes modificaciones. Se pesó 1.0 g de harina en un tubo de ensayo graduado, se añadieron 10 mL de agua destilada, agitando suavemente para dispersar la muestra. Luego se dejó reposar por 24 h a 18 °C, después se midió el volumen final que ocupa la muestra. La capacidad de hinchamiento se determinó dividiendo el volumen de nivel de muestra final entre el peso de la muestra, expresada como sólidos.

- **Formación de espuma y estabilidad espumante**

Estas propiedades fueron determinadas de acuerdo con el método de Coffman y García (1977), para la determinación de la capacidad y estabilidad espumante de las muestras analizadas. Se preparó una suspensión con 100 mL de agua destilada y 2.0 g de harina en un vaso precipitado de 100 mL. Después, se licuó durante 3 min y se transfirió a una probeta de 250 mL y se midió el volumen. La capacidad de formación de espuma se expresó como porcentaje de aumento de volúmenes iniciales y después de la formación de la espuma.

- **Prueba de expansión**

Las propiedades fermentativas de una harina se concretan en la producción de gas durante la fermentación de la masa. Esta propiedad suele medirse mediante la agregación de levadura a la masa e incubándola a una temperatura de 30 °C. Para esta prueba se molió en un mortero 1.0 g de sal y 2.0 g de azúcar, se mezclaron con 25 g de harina. Por otra parte, se diluyeron 2.0 g de levadura en con base en la cantidad de agua de la prueba de absorción, y se amasó. Una vez formada la masa se procedió a formar un pequeño cilindro, reportando las medidas de altura y el diámetro de la base, posteriormente se colocó dentro de una copa volumétrica y cubrió con papel aluminio. A continuación, se puso la copa en baño maría a 30 °C durante un periodo de 1 h, esperando su expansión. Después de este tiempo se midió nuevamente la altura y diámetros del cilindro, además del volumen (en caso de la deformación del cilindro de masa).

- **Cifra de Pelshenke**

Esta prueba determina la estabilidad de una masa que sufre el proceso de fermentación, se observa el tiempo que tarda en desintegrarse una bola de masa sujeta a una fermentación bajo condiciones estandarizadas (Serna, 2003). La prueba de la cifra de Pelshenke se realizó de acuerdo con el método 56-60 de la A.A.C.C. (1976). Se pesaron 4.0 g de harina y se mezclaron con 2.2 mL de una suspensión de levadura al 10% a 28 °C, la cual se preparó previamente, se amasó y se formaron tres bolitas del mismo tamaño. En un vaso de precipitado se colocaron 120 mL de agua a 30 °C y se mantuvieron así durante toda la prueba. Las tres bolitas de masa se colocaron dentro del vaso y se activó el cronómetro al momento de la inmersión. Se determinaron el tiempo de flotación (cuando la bolita de masa llega a la superficie del agua) y de desintegración (pérdida del contorno y desprendimientos de fragmentos de masa).

2.3 Propiedades gravimétricas

• Densidad aparente

La densidad aparente (ρ_b) fue determinada considerando el principio del método 55-10.01 (AACC Int, 2000), mediante la relación entre la masa de harina (g) y el volumen de la medida de capacidad (500 cm³). El recipiente sugerido en el método oficial se sustituyó por un vaso de precipitado. Las mediciones fueron realizadas por triplicado, colocando 500 cm³ de las harinas en un vaso de precipitado previamente tarado, pesado en una balanza analítica de la marca OHAUS, modelo H-7294 (precisión 0.01 g, EE. UU). La densidad aparente (ρ_b) se calculó con la siguiente fórmula (Bhiese et al., 2014):

$$\rho_b = \frac{m}{V} \quad (2)$$

donde: ρ_b es la densidad aparente o densidad en volumen reportada en (g/cm³); m es la masa de la muestra (g); V es el volumen ocupado por la muestra en (mL).

• Densidad real

La densidad real (ρ_t) fue determinada siguiendo el método propuesto por Bressani et al. (2001) el cual consiste en medir el volumen al compactar en un cilindro de 25 mL de 20 g de harina y expresando el resultado en g/mL.

$$\rho_t = \frac{mg}{V_d} \quad (3)$$

donde: ρ_t es la densidad real (g/cm³); mg es la masa de la harina (g); y V_d es el volumen de desplazamiento de la harina (mL).

• Porosidad

El porcentaje de porosidad (ε), fue calculado a partir de tres repeticiones siguiendo la siguiente relación (Mohsenin, 1986):

$$\varepsilon = \left(\frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (4)$$

donde: ε es la porosidad; ρ_t es la densidad real; y ρ_b es la densidad aparente.

2.4 Propiedades friccionales

• Fricción interna

La fricción interna (μ_i) fue determinada utilizando un embudo de plástico con tapa inferior removible (Weston®, modelo W-70945, México), el cual se llenó con las harinas. Luego se quitó la tapa permitiendo a las harinas conseguir su inclinación natural. El ángulo de reposo fue calculado (midiendo previamente el radio y la altura de la masa de las harinas) con la siguiente ecuación (Dutta et al., 1988):

$$\mu_i = \tan \beta = h/r \quad (5)$$

donde: μ_i es la fricción interna; h es la altura del cono formado; y r es el radio del cono.

- **Fricción externa**

La fricción externa (μ_e) de las harinas fue determinado sobre una placa de diferentes materiales (acero inoxidable, madera, plástico de polietileno, vidrio y piso cerámico), para ello se colocaron 100 g de harina sobre la placa y se inclinó gradualmente hasta lograr el deslizamiento completo de la muestra. En esta posición, el ángulo de inclinación fue medido con un transportador de plástico (ULINE® modelo H-5648, México), según la siguiente ecuación:

$$\mu_e = \tan \alpha \quad (6)$$

donde: μ_e es la fricción externa; $\tan (\alpha)$ es el ángulo de inclinación.

2.5 Propiedades de textura

- **Textura**

La textura fue determinada con un analizador de textura marca Brookfield modelo CT3 (China), para ello se elaboró una mezcla de 4.5 g de harina y 2.5 mL de agua destilada. La mezcla fue amasada durante 5 min, posterior a ello se moldeó manualmente un cubo de aproximadamente 2.0 cm por lado, el cual se analizó con el texturómetro, obteniendo datos de Dureza (g), Deformación según dureza (mm), % de Deformación según dureza (%), Trabajo dureza terminado (mJ), Deformación recuperable (mm), Trabajo recuperable (mJ), Trabajo total (mJ), Fuerza adhesividad (g), Adhesividad (mJ), Resiliencia y Longitud de la muestra (mm).

2.6 Propiedades reológicas

- **Viscosidad**

La identificación del tipo de fluido se determinó mediante el uso del Reómetro Brookfield DV3T. Para ello se elaboró una masa semilíquida para lo cual se tomó 1.0 g de cada harina y diluidas en 2.0 mL de agua.

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica fue medida con un conductímetro (Hanna® HI98129), para la cual se elaboró una mezcla de harina (5 %) de agua ionizada (95 %) a diferentes temperaturas (15° C, 25° C y 35° C), durante 2 min.

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

La determinación de pH en las harinas fue realizada de acuerdo con el método 943.02 de la A.O.A.C. (1997). Se pesaron 10 g de harina y se mezclaron con 100 mL de agua a 25 °C (recién hervida) en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se dejó en reposo durante 30 min, agitando constantemente. Una vez transcurrido este tiempo se filtró el contenido del matraz y se procedió a medir el pH con un potenciómetro digital marca Oakton™, previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4.0 y 7.0.

2.7 Análisis de datos

Todas las variables de las harinas de tallos y hojas de Yuca fueron comparadas mediante una prueba de t-student ($\alpha < 0.05$) en el lenguaje de programación r-project® (3.6.3-2022.02.0-443) bajo la interfaz RStudio®, ambos de libre distribución.

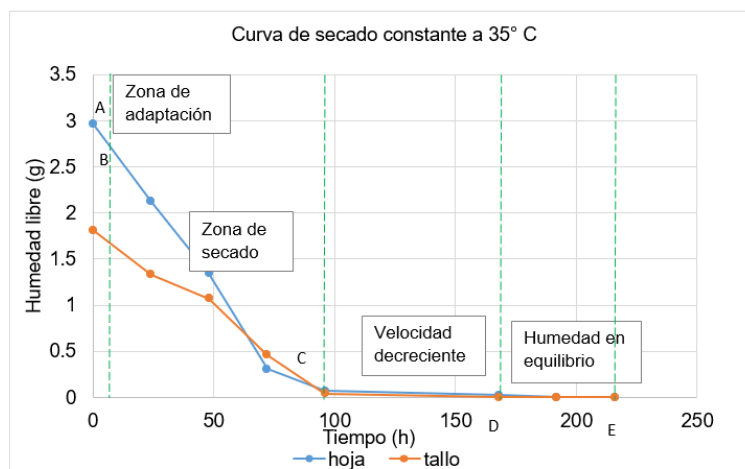
3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades físicas

- **Secado**

De acuerdo con la curva de secado, en la zona de secado la pérdida de peso en las hojas fue de 30 g/h mientras que para los tallos fue de 18 g/h. Después de 72 h en los tallos se perdió el 75 % del peso y 90 % en las hojas (Figura 1). Alcanzado el peso constante a partir de las 150 h del proceso de secado. Este fenómeno se atribuye a la compactación de la materia causada por la eliminación de agua libre, lo que resulta en un aumento en la concentración de solutos en el tejido, complicando la pérdida de agua (Rastogi *et al.*, 2000).

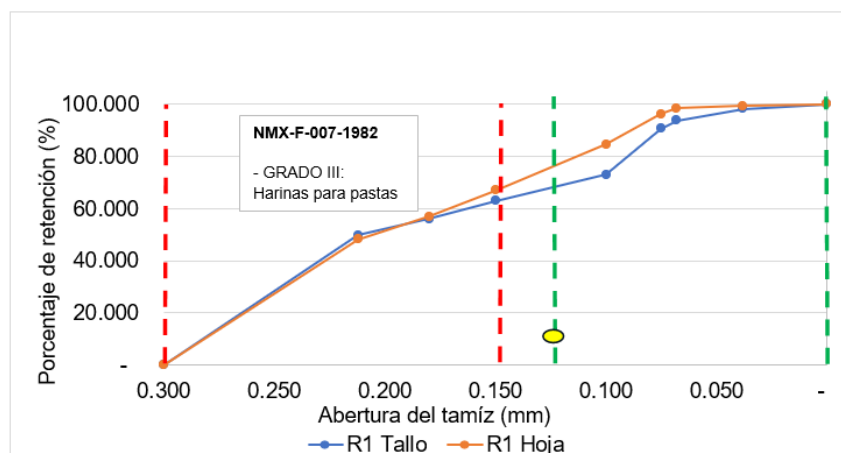
Figura 1: Cinética de secado de la harina de tallo y hojas de *Yucca decipiens* a 35 °C



- **Análisis granulométrico**

Los resultados del tamizado muestran que las harinas de las hojas y tallos de la yuca (*Yucca decipiens*) tienen mayor porcentaje de retención en el intervalo de tamaño entre 0.150 mm y 0.212 mm (Figura 2).

Figura 2: Tamizado de harina del tallo y hojas de *Yucca decipiens*.



Las líneas rojas en la Figura 2 muestran el límite de la clasificación de harina de grado III de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NMX-F-007-1982), y las líneas verdes la clasificación para las harinas más finas clasificadas como harinas de grado I sin embargo esta clasificación indica que no más del 10 % de retención se debe presentar en el tamiz de 0.125 mm de abertura de malla, para lo cual estas harinas no cumplen con lo establecido para esta clasificación. La norma menciona también el grado II; sin embargo, no especifica un tamaño de partícula ya que como se menciona es una clasificación para galletas y en éstas se utilizan mezclas variables de acuerdo con el tipo de galleta. Por lo cual de acuerdo con el tamizado las harinas, éstas reúnen las condiciones de granulometría que la norma (NMX-F-007-1982) establece y pueden ser clasificadas como harinas de grado II y grado III, en el sentido que el 73 % es el mínimo de retención de las fracciones de 0.297 y 0.149 mm de abertura de malla; equivalentes a 50 y 100 ASTM. La malla # 50 empleada para el análisis en este trabajo es ligeramente más abierta (0.300 mm). Estas harinas son clasificadas y designadas de acuerdo con la Norma Mexicana para la harina de trigo como harina de Grado III y II para elaboración de galletas y pastas para sopa. Actualmente existe muy poca información del proceso de tamizado de harinas de los órganos de las yucas.

- **Índice del tamaño de partícula**

El índice de tamaño de partícula de la harina de las hojas de yuca (124.69 ± 15.29) fue más fino que el de la harina de tallo (144.08 ± 20.16), por lo que pueden considerarse más cohesivas (Gómez *et al.*, 1987). Este índice en las harinas de los órganos de yuca es mayor a los reportados por Castaño *et al.* (2017) en harinas de tritíceas híbridas con un índice de tamaño de partícula de 26.0 estas harinas tienen un tamaño de partícula fina con valores de almidón dañado relativamente bajos (Ramírez *et al.*, 2003). Escalante-Aburto *et al.* (2019) encontraron que la harina de maíz azul (*Zea mays* L.) molido denota alta proporción de partículas finas con índice de partícula de 83 a 94, más similares con el índice de tamaño de partícula de las harinas de los órganos de la yuca. De acuerdo con Budâcan *et al.* (2013) las muestras de maíz molido fino producen extrudidos con más expansión que las muestras con molido medio y grueso (ITP bajo) a determinadas condiciones de procesamiento. Sin embargo, la granulometría de las harinas de yuca tiene un índice de tamaño de partícula bajo y podría integrarse en mezclas con otras harinas como la harina de maíz.

- **Dimensiones de partículas**

De acuerdo con las observaciones microscópicas de las harinas de los diferentes órganos de la yuca, se podría predecir, que las harinas de tallo en su mayoría presentan una estructura más fina que las de hojas (Tabla 1) aunque son muy similares, esta diferencia es atribuida a las fibras presentes en las hojas, su resistencia, y que las dimensiones dependen de la orientación de las partículas.

Tabla 1: Perfil de dimensiones de partículas de harinas de órganos de yuca.

Producto evaluado	Área (mm ²)	Perímetro (mm)
Tallos	0.02 ± 0.01	0.71 ± 0.34
Hojas	0.03 ± 0.02	0.79 ± 0.36

3.2 Propiedades funcionales

Dentro de las propiedades funcionales de las harinas de yuca, destaca que el porcentaje de expansión de la harina de tallo fue mayor que el de la harina de hojas, la prueba de expansión en harinas está relacionada con la presencia de gluten en harinas (Neri-González, 2016),

debido a sus propiedades facilitan el esponjamiento de la masa durante la fermentación (Hernández, 2003). Mientras que el resto de las propiedades son similares (Tabla 2).

Tabla 2: Propiedades funcionales de harinas de órganos de yuca.

Órgano	Absorción de agua (mL g ⁻¹)	Absorción de aceite (mL g ⁻¹)	Porcentaje de expansión (%)	Capacidad de hinchamiento (mL g ⁻¹)	Capacidad de formación de espuma (mL g ⁻¹)	Estabilidad de formación de espuma (%)
Tallo	0.11 ±0.05	0.41 ±0.11	45.5 ±6.36	0.65 ±0.36	3.57 ±1.41	100 ± -
Hoja	0.11 ±0.03	0.39 ±0.05	35.7 ±6.86	0.62 ±0.54	3.47 ±1.96	100 ± -

Las harinas de yuca requieren una cantidad de agua similar a las harinas de trigo para formar la masa (Neri-González et al., 2016), la absorción de agua en harinas es esencial para la consistencia de la masa y afecta la viscosidad, el volumen, la textura y el proceso de cocción de los productos alimenticios (Niba et al., 2001). Sin embargo, factores como el pH, la fuerza iónica y la temperatura afectan la capacidad de retención de agua de las proteínas, mientras que aminoácidos polares como lisina, treonina y triptófano influyen en su poder de hinchamiento y retención de agua (Badui, 2006; Andrade et al., 2012; Yusuf et al., 2008).

Por otro lado, la capacidad de absorción de aceite es menor en comparación con otras fuentes, como el frijol chino (Miquilena et al., 2016), la cual puede ser influenciada por factores como la estructura de la superficie y la porosidad (Dobarganes y Márquez, 2000).

En cuanto a la formación de espuma, tanto la harina de tallo como de hoja de yuca presentan un alto rendimiento, atribuido a la naturaleza anfipolar de las proteínas que actúan como agentes tensoactivos (Cheftel et al., 2003).

• Cifra de Pelshenke

De acuerdo con la prueba de fermentación, la harina de los tallos de yuca tiene menor tiempo de flotación con respecto a la harina de las hojas (Tabla 3), la cual es similar a la de las harinas de trigo con un tiempo de flotación de 1:31 min y un tiempo de desintegración de 46:03 min (Neri-González et al., 2016). Mientras que ambas harinas de yuca presentaron un tiempo de desintegración similar. De acuerdo con Wang et al. (2016) el gluten parece atrapar las moléculas de CO₂ generadas durante el proceso de fermentación, facilitando una flotación más rápida en comparación con las masas que carecen de esta proteína. En este sentido, los resultados obtenidos se alinean con los parámetros definidos en el método 56-60 de la A.A.C.C. (1976), que puede categorizar las harinas de tallos y hojas de yuca como pertenecientes a la clasificación de trigos suaves del tipo débil (Tabla 3).

Tabla 3: Prueba de fermentación de harinas de órganos de yuca.

Harina	T. Flotación (min)	T. de desintegración (min)
Tallo	0.5 ± 0:28	19.77 ± 0:44
Hoja	1.12 ± 0:32	19.68 ± 1:28

3.3 Propiedades gravimétricas

• Densidad aparente

La densidad real de la harina de tallos de yuca (0.42 g/mL) fue mayor que la de la harina de las hojas (0.29 g/mL) (Tabla 4), estas cifras son cercanas a la densidad de la harina de maíz

de 0.420 - 0.435 (Bedolla y Roney, 1994). Los valores altos de densidad sugieren que son harinas de una granulometría fina (Bressani et al., 2001).

Tabla 4: Propiedades gravimétricas de harina de tallo y hojas de *Yucca decipiens*.

Harina	Densidad aparente (g mL ⁻¹)	Densidad real (g mL ⁻¹)	Porosidad (%)
Tallo	0.24 ±0.07	0.42 ±0.09	44 ±0.07
Hoja	0.25 ±0.05	0.29 ±0.06	38 ±0.10

La porosidad de las harinas de órganos de yuca se encontró entre 38 y 44 %. Estos valores son similares a la porosidad de harinas de amaranto (35%) y trigo (65%) (Silupo et al., 2021). La porosidad, según Dickinson (2010), se relaciona con la formación de pequeñas burbujas de aire durante la formulación que retienen el CO₂.

3.4 Propiedades friccionales

• Fricción interna

Las harinas de hojas y tallos de yuca presentaron un coeficiente de fricción interna de 0.92 ±0.09 y 0.85 ±0.10 respectivamente. En contraste con investigaciones previas, los resultados de fricción interna superan los valores encontrados en harinas de tuna por Álvarez-Castillo *et al.* (2022), pero son comparables a los de harinas de ejote y chícharo, según Martínez-Betacourt *et al.* (2022). Mientras Guerra *et al.* (2017) encontró valores similares para harinas de semillas de calabaza con cáscara (0.81) y harina de semillas de calabaza (*Cucurbita sp.*) sin cáscara (0.56).

Estos valores similares a los de harinas de semillas con cáscara se atribuyen a la presencia de fibra en ambas, aunque también la fricción interna está influenciada por diversas características como tamaño, forma, volumen, densidad, superficie del grano, contenido de humedad y orientación de las partículas, como indican Ospina (2001). Según Barbosa *et al.* (2005), los valores obtenidos en esta investigación sugieren que el flujo de estas harinas es limitado.

• Fricción externa

Las harinas de ambos órganos de yuca presentaron el mayor coeficiente de fricción externa sobre la madera, mientras que el menor coeficiente se encontró sobre el piso cerámico en comparación con los otros materiales. Los valores encontrados en esta investigación están en el rango de lo reportado por Sologubik *et al.* (2013) en semillas de cebada en latón galvanizado (0.27-0.68), en melamina de 0.25 a 0.70 y en acero inoxidable de 0.27 a 0.71 (Tabla 5).

Tabla 5: Coeficiente de fricción externa de harina de hojas y tallo de *Yucca decipiens*

Harina	Material	Ángulo (°)	μ _e (-)
Hojas	Acero inoxidable	30.65	0.59 ± 0.03
	Madera	35.25	0.76 ± 0.18
	Plástico de polietileno	34.9	0.70 ± 0.03
	Vidrio	32.2	0.63 ± 0.02
	Piso cerámico	27.6	0.52 ± 0.04
Tallos	Acero inoxidable	31.5	0.61 ± 0.03
	Madera	35.15	0.76 ± 0.18
	Plástico de polietileno	35	0.70 ± 0.04

Vidrio	31.45	0.61 ± 0.03
Piso cerámico	28.75	0.55 ± 0.03

Los resultados de esta investigación fueron similares a los encontrados en harina de semillas de calabaza con cáscara de 0.59 y 0.81 en vidrio y madera, respectivamente (Guerra *et al.*, 2017), en semillas de chícharo sobre caucho (0.388-0.413), aluminio (0.292–0.351), acero inoxidable (0.270–0.311) y hierro galvanizado (0.360–0.409) (Ganjloo *et al.*, 2018).

3.5 Propiedades de textura

- **Textura**

En la prueba del análisis del perfil de textura para las harinas de las hojas y tallos de yuca la dureza fue mayor a las harinas de tallos. Se observó el mismo comportamiento para las demás variables de esta harina (Tabla 6).

Tabla 6: Perfil de textura de masas de órganos de *Yucca decipiens*

Variable	Hoja	Tallo
Dureza (g)	621.83 ± 21.70	3,135.48 ± 91.38
Deformación según Dureza (mm)	7.64 ± 0.53	12.42 ± 2.41
Deformación según dureza (%)	38.26 ± 2.61	63.13 ± 10.57
Deformación Recuperable (mm)	1.15 ± 0.08	18.82 ± 2.27
Trabajo Recuperable (mJ)	1.42 ± 0.14	0.94 ± 0.55
Trabajo Total (mJ)	27.60 ± 3.38	63.86 ± 23.34
Pico Presión (N/m ²)	12,040.87 ± 5,207.03	73,834.67 ± 5,726.64
Deformación en Pico de Carga	0.31 ± 0.09	0.61 ± 0.14
Fuerza adhesividad (g)	26.21 ± 8.86	41.35 ± 2.87
Adhesividad (mJ)	0.46 ± 0.32	0.72 ± 0.40
Resiliencia:	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Longitud de la muestra (mm)	20.00 ± -	20.00 ± -

El perfil de textura en las masas de harina son características importantes en los productos terminados, en este caso los valores de todas las características de textura fueron menor en la masa de hojas que en la masa de tallos, a excepción de la resiliencia esta característica mostró la misma tendencia en ambas masas (es similar a la de la masa de tallo 0.06). Sin embargo, la resiliencia es muy baja en ambos casos esto indica que la deformación es muy alta y que el tiempo que tarda la miga (masa) en volver a su sitio tras presionarla es muy baja.

Por otro lado, la fuerza de adhesión de las harinas de los órganos de yuca es menor que la de trigo con 404.83 g, mientras que la dureza de la harina de trigo (4,543.85 g) es similar a la de la harina de tallo de yuca (3,135.48 g) y el porcentaje de deformación es menor que la harina de trigo (Domínguez Zárate, 2019).

3.6 Propiedades reológicas

- **Viscosidad**

El perfil de viscosidad de las harinas es presentado en la Tabla 7, los resultados obtenidos de viscosidad a una temperatura de aproximadamente 20 °C para la harina de hoja y tallo fueron diferentes en ambos casos.

Tabla 7: Perfil de viscosidad de harinas de órganos de yuca.

Harina	viscosidad (cP)	fuerza de cizalla (dyne/cm ²)	temperatura (°C)	torque (%)	rango de corte (1/s)	de velocidad (RPM)
Tallo	3.33 ± 0.34	5.69 ± 0.28	21.85 ± 0.35	1.25 ± 0.07	± 165 ± -	22 ± -
Hoja	5.97 ± 0.87	8.905 ± 0.10	22.05 ± 0.21	1.95 ± 0.21	± 165 ± -	22 ± -

En la Tabla 7 se muestra que las harinas de tallo y hojas expuestas a una temperatura de 20 °C y con tamaño de partícula fino (0.116 mm y 0.147 mm respectivamente) dieron lugar a valores bajos de viscosidad, por lo que estos valores fueron menores a lo reportado en otras investigaciones para diferentes tipos de harinas, debido a que presentan daños termo mecánicos mayores que las harinas de hojas y tallos. Contreras-Jiménez *et al.* (2014) mencionan que obtuvieron una viscosidad máxima de 2584 ± 427 cP, para la harina de nixtamal, mientras que las harinas extrudidas en general mostraron valores de viscosidad desde 665.8 ± 6.6 hasta 2403.5 ± 34.6 cP y con un tamaño de partícula grande (1.3 mm).

• Conductividad eléctrica y pH

En la siguiente Tabla 8 se muestran los valores de conductividad y pH de las harinas de los órganos de (tallo y hojas) de la planta de yuca, la conductividad eléctrica de las harinas fue mayor en ambos órganos a 35 °C.

Tabla 8: Conductividad eléctrica y pH de harinas de tallos y hojas de *Yucca decipiens*

Harina	Conductividad eléctrica (S)			pH
	15 °C	25 °C	35 °C	
Tallo	2303.5 ± 24.32	2371.5 ± 35.35	2424.50 ± 26.87	5.53 ± 0.39
Hoja	2996 ± 16.49	3039 ± 26.97	3074.75 ± 36.06	9.38 ± 0.42

La relación entre la conductividad eléctrica y el tiempo de procesamiento es notable. A medida que la muestra alcanza temperaturas más altas en menos tiempo, se espera que haya menos daño en el almidón y otros compuestos, lo que se traduce en una menor gelatinización. Este efecto es particularmente evidente cuando se analiza el cocimiento y la viscosidad del producto.

Independientemente del voltaje aplicado y la temperatura, se observa que a mayor tiempo de procesamiento conlleva mayor cocimiento, lo que se refleja tanto en la viscosidad como en la gelatinización del producto final. Este resultado sugiere que la razón de calentamiento, es decir, el tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima, puede ser el factor principal que influye en la conductividad eléctrica. Por lo tanto, se puede anticipar que las muestras procesadas a temperaturas más bajas de 15 °C, mostrarán menor grado de cocimiento en comparación con aquellas procesadas a temperaturas más altas. Finalmente, esta investigación se centra en maximizar el uso responsable de las harinas derivadas de la yuca, reconocidas por su valor en la industria alimentaria y en la producción de diversos biomateriales. Los hallazgos sobre las propiedades dimensionales de estas harinas establecen criterios de selección cruciales para asegurar su calidad fisiológica óptima. Esto permite definir requerimientos específicos en equipos, almacenamiento y transporte, garantizando un control riguroso en los procesos de transformación.

4. Conclusiones

Las propiedades dimensionales juegan un papel clave al predecir la textura de los productos finales, evitando posibles defectos que afecten la calidad del producto. Además, se confirma que el grado de finura cumple con los estándares requeridos (NOM-007-1982), validando su idoneidad para la elaboración de diversos alimentos, como galletas, pastas para sopa y otros productos alimenticios.

El proceso de secado de hojas y tallos de yuca muestra estabilización significativa en la pérdida de humedad, destacando la importancia de las propiedades funcionales de las harinas resultantes para su uso en productos alimenticios. Estas harinas exhiben características únicas, como menor absorción de agua y aceite, pero mayor capacidad de expansión y formación de espuma, lo que sugiere su versatilidad en la industria alimentaria. En términos de textura, las harinas de tallos y hojas de yuca presentan diferencias significativas, siendo la masa de hojas más suave y menos dura en comparación con la de tallos. Se destaca la influencia de la conductividad eléctrica en el proceso de calentamiento durante el procesamiento, subrayando la importancia de considerar esta propiedad en la industria alimentaria.

Además, estas harinas contribuyen a la diversificación de fuentes de nutrición y al desarrollo de productos alimenticios accesibles y nutritivos, esta investigación apoya directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 2: Hambre Cero. Asimismo, al explorar nuevas aplicaciones industriales para las harinas de yuca y fomentar la innovación en productos y procesos, esta investigación también contribuye al ODS número 9: Industria, Innovación e Infraestructura. Así, este estudio no solo promueve la sostenibilidad y la eficiencia en la producción industrial, sino que también aborda directamente los desafíos globales relacionados con la seguridad alimentaria y la innovación industrial, impulsando el progreso hacia un futuro más sostenible y equitativo.

5. Referencias

- Álvarez-Castillo, Mónica de Jesús. (2022). Características físicas y químicas de las semillas de tuna (*Opuntia* spp) para uso agroindustrial. Salinas de Hidalgo, S. L. P.: La autora, Tesis (Maestría en Ciencias, especialista en Innovación en el Manejo de Recursos Naturales), Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí.
- Andrade, M., Tapia, D., Menegalli, F. (2012) Physical-Chemical, thermal, and functional properties of achira (*Canna indica* L.) flour and starch from different geographical origin. *Starch/Shake* 64: 348-358.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2005). Official methods of analysis of A.O.A.C. internacional. (18ava ed.). Maryland, USA: AOAC. Internacional. Disponible 22 Mayo 2024. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1997) Association of Official Analytical Chemists International Official Methods of Analysis. 16th Edition, AOAC, Arlington. Disponible 22 May 2024. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- Badui, S. (2006). Química de los alimentos. Cuarta edición. Editorial Pearson Educación, México.
- Barbosa-Cánovas, G. V., E. Ortega-Rivas., P. Juliano. and H. Yan. (2005). Particle properties. In: Food powders, physical properties, processing and suntuonality. *Food engineering series*. pp: 55-88.
- Bedolla S, & L. W. Rooney. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereals Food World*. 29(11): 732-735.

- Beuchat, L. (1977). Functional and electrophoretic characteristics of succynalated peanut flour proteins. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 25: 258-263.
- Bressani, Ricardo, Turcios, Juan C, Reyes, Luis, & Mérida, Roberta. (2001). Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América Central. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51(3), 309-313. Recuperado en 18 de enero de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000300015&lng=es&tlng=es.
- Budâcan, I., Pop, D., & Drocaș, I. (2013). Size distribution of maize milled particles obtained by using a hammer mill. *Acta Technical Napocensis*, 56(4), disponible en: <https://atnamam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/108>.
- Castaño, M.N, Ferrari, E.D, Picca, A.T, Curti, M.I, Ribotta, P.D, León, A.E, Ferreira, V.A, Grassi, E.M, Ferreira, A, di Santo, H.E, Castillo, E.A, & Paccapelo, H.A. (2017). Caracterización de harinas de tritíceas híbridas. *Agriscientia*, 34(1), 15-25. Recuperado en 15 de marzo de 2024, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2017000100002&lng=es&tlng=en.
- Coffman, C.; García, V. (1977). Functional properties and amino acid content of a protein isolate from mung bean flour. *Journal Food Technology* 12: 473-487.
- Contreras Jiménez, B. Morales Sánchez, E. Reyes Vega, M. L. & Gaytán Martínez, M. (2014). Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura, CyTA. *Journal of Food*, 12:3, 263-270, DOI: 10.1080/19476337.2013.840804
- Dickinson, E. (2010). Food emulsions and foams: stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15, 40-49.
- Dobarganes, C.; Marquez, G. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology* 102: 521-528
- Domínguez-Zarate, P. A., García-Martínez, I., Güemes-Vera, N., & Totosaus, A. (2019). Textura, color y aceptación sensorial de tortillas y pan producidos con harina de ramón (*Brosimum alicastrum*) para incrementar la fibra dietética total. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 699-719.
- Dutta, S. K., V. K. Nema., y R. K. Bharddwaj. (1988). Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 39: 259-268.
- Efferth T, Fu YJ, Zu YG, Schwarz G, Konkimalla VS, Wink M. (2007). Molecular target-guided tumor therapy with natural products derived from traditional Chinese medicine. *Curr Med Chem*. 14(19):2024-32. doi: 10.2174/092986707781368441. PMID: 17691944.
- Escalante-Aburto A., Ponce-García N., Ramírez-Wong B., Figueroa J.D.C. (2019). Efecto del tamaño de partícula y temperatura en la viscosidad de botanas extrudidas nixtamalizadas de maíz azul integral. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 4 (56-65).
- Ganjloo, A., M. Bimakr., S. Zarringhalami., M. Jalili-Safaryan, M. y Ghorbani. (2018). Moisture-dependent physical properties of green peas (*Pisum sativum* L.). *International Food Research Journal*. 25(3): 1246-1252.
- García-Mendoza, A. (2004). Agaváceas. En: A. García-Mendoza, M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.). Biodiversidad de Oaxaca. Inst. Biología, UNAM Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-WWF. México. Pp. 159-169.

- Gómez, M. H., L. W. Rooney, R. D. Waniska, and R. L. Pflugfelder. (1987). Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32: 372-377.
- Guerra, R. I., E. D. Qu K., L. A. López M., M. A. González A. y A. Leyva M. (2017). Caracterización física y química de la semilla de calabaza de castilla tipo criolla (*Cucurbita* spp). Tesis de Maestría no publicada. Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. Instituto tecnológico superior Zacatecas Norte, San Luis Potosí.
- Hernández, A. (2003). Microbiología Industrial. Primera edición. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.
- Hochstätter, F. (Ed.). (2004). *Yucca* (Agavaceae). Band 3 México. Selbst Verlag. Portland, Oregon. 47 p.
- Jiménez, G.G., Durán, A.G., Macías, F.A. y Simonet, A.M. (2021). Structure, Bioactivity and Analytical Methods for the Determination of Yucca Saponins. *Molecules*. 26 (17): 5251.
- Miquilena, E.; Higuera, A.; Rodríguez, B. (2016). Evaluación de propiedades funcionales de cuatro harinas de semillas de leguminosas comestibles cultivadas en Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (Universidad de Zulia)* 33: 58-75.
- Mohsenin, N. N. (1970). Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publisher (1st Edn). New York, USA. pp: 587-593.
- Mohsenin NN. (1986). Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics, and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers. 2nd Edition. New York, NY, USA. 891 p.
- Neri-González, M.C. (2016). APROVECHAMIENTO DEL CAMOTE (*Ipomoea batatas*) PARA EL DESARROLLO DE HARINAS FUNCIONALES Y SU APLICACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE MUFFINS REDUCIDOS EN GLUTEN. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Puebla.
- Niba, L.L., Bokonga, M.M., Jackson, E.L., Schlimme, D.S., Li, B.W., (2001). Physicochemical properties and starch granular characteristics of flour from various *Manihot esculenta* (cassava) genotypes. *J. Food Sci.* 67 (5), 1701– 1705.
- NMX-F-007-1982 (NORMA MEXICANA NMX-F-007-1982). (1982). Harina de trigo. http://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-F-007-1982_harina_de_trigo.pdf. (Retrieved: May 2021).
- Ordóñez, M. R., M. C. Gely. Y A.M. Pagano. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Av. Cien. Ing.*, 3(3): 153-17.
- Ospina M, J. (2001). Características físico-mecánicas y análisis de calidad de granos. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Agrícola. pp: 225.
- Patel, S. and Goyal, A. (2012). Recent Developments in Mushrooms as Anti-Cancer Therapeutics: A Review. 3 *Biotech*, 2, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13205-011-0036-2>
- Pearlstein T, Steiner M. (2008). Premenstrual dysphoric disorder: burden of illness and treatment update. *J Psychiatry Neurosci*. 33(4):291-301. PMID: 18592027; PMCID: PMC2440788.
- Ramírez, A.; G.T. Pérez, P.D. Ribotta y A.E. León. (2003). The occurrence of friabilins in triticale and their relationship with grain hardness and baking quality. *J. Agric. Food Chem*. 51(24):7161-7181.

- Rastogi N. K., Raghavarao K., Niranjana K., and D. Knorr. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends Food Science and Technology* 13(2):48-59.
- Robertson, G.; Monredon, P.; Dysseleer, F.; Guillon, R.; Amado, J. (2000). Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: a European collaborative study. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 33: 72-79.
- Serna, H. (2003). Gerencia estratégica. teoría-metodologíaalineamiento, implementación y mapas estratégicos. Índices de gestión. Bogotá, Colombia: 3R Editores 9ª edición
- Sologubik, C.A., L.A. Campañone., A.M. Pagano. y M.C. Gely. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Ind. Crops Prod.* 43: 762-767.
- Wang, J.J.; G. Liu, Y.-B. Huang, Q.-H. Zeng, G.-S. Song, Y. Hou, L. Li and S.-Q. Hu. (2016). Role of N-terminal domain of HMW 1Dx5 in the functional and structural properties of wheat dough. *Food Chemistry* 213: 682-690.
- Yusuf, A., Ayedun, H., Sanni, L. (2008). Chemical composition and functional properties of raw and roasted Nigerian benniseed (*Sesamum indicum*) and bambara groundnut (*Vigna subterranean*). *Food Chemistry* 111: 277-282.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

