

Artículo de Revisión

# Propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas de alimentos a base de sorgo: Avances y oportunidades para su aprovechamiento integral

Nutritional, functional and bioactive properties of sorghum-based foods: Advances and opportunities for its integral exploitation

**Arely León-López<sup>1\*</sup>, Ana María Mendoza-Wilson<sup>1</sup>, René Renato Balandrán-Quintana<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, No. 46, 83304, Hermosillo, Sonora, México.

\*Correspondencia: [arely.leon@ciad.mx](mailto:arely.leon@ciad.mx) (Arely León López)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v16i2.912>

Recibido: 20 de enero de 2022; Aceptado: 14 de marzo de 2022

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

## Resumen

En la actualidad existe una demanda creciente por parte del consumidor de alimentos, que además de ser nutritivos y apetecibles, aporten un beneficio adicional a la salud. La evidencia científica de los efectos benéficos que el sorgo (*Sorghum*), tiene en la salud humana ha ido aumentando, y por lo mismo, la demanda de alimentos a base de este cereal también se ha incrementado, incluso en los mercados alimentarios de países desarrollados. Debido a su composición química, el grano de sorgo es considerado una fuente rica de nutrientes y compuestos bioactivos. Sin embargo, el reacomodo estructural adoptado y las interacciones que establecen dichos compuestos, compromete su biodisponibilidad, digestibilidad, funcionalidad y propiedades sensoriales. No obstante, el sorgo se distingue de otros cereales por su alta tolerancia al calor y resistencia a la sequía, lo que amplía su potencial como cultivo sostenible para la futura seguridad agroalimentaria ante el desafío del cambio climático. En este escenario, parte de la comunidad científica ha orientado su investigación en busca de mejorar los alimentos tradicionales que se derivan del sorgo, así como a la elaboración de alimentos novedosos para impulsar su aprovechamiento a través de la industria alimentaria. En esta revisión se analizan los avances en las mejoras de las propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas de alimentos a base de sorgo y se discuten algunas áreas que han sido poco investigadas, las cuales constituyen una oportunidad para el aprovechamiento integral de las propiedades del sorgo en la alimentación humana.

**Palabras clave:** Sorghum, composición, alimentos de sorgo, propiedades funcionales

## Abstract

Nowadays there is a growing demand by the consumer for foods that, in addition to being nutritious and palatable, provide an additional benefit to health. Scientific evidence of the beneficial effects that sorghum has on human health has been increasing, and for this reason, the demand for food based on this cereal has also increased, even in the food markets of developed countries. Due to its chemical composition, sorghum grain is considered a rich source of nutrients and bioactive compounds, however, the adopted structural rearrangement, and the interactions established by said compounds, compromises its bioavailability, digestibility, functionality, and sensory properties. Nevertheless, sorghum is distinguished from other cereals by its high tolerance to heat and resistance to drought, which expands its potential as a sustainable crop for future agro-food security in the face of the challenge of climate change. On this background, part of the scientific community has directed its research in search of improving traditional foods derived from sorghum, as well as the development of novel foods to promote their use through the food industry. In this review, advances in the improvement of the nutritional, functional and bioactive properties of sorghum-based foods are analyzed and some areas that have been little investigated are discussed, which constitute an opportunity for the integral use of the properties of sorghum in human food.

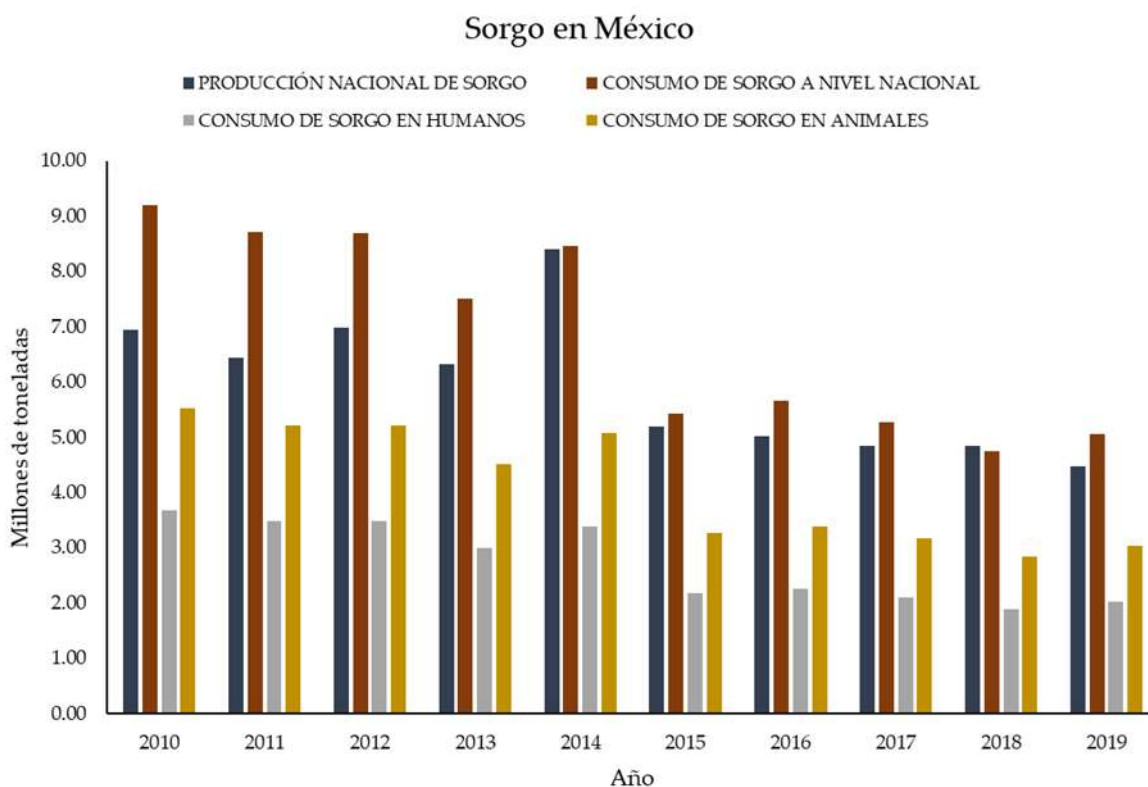
**Keywords:** Sorghum, composition, sorghum-based foods, functional properties

## Introducción

Los cereales forman parte esencial tanto de la dieta de animales como del ser humano. El sorgo se encuentra dentro de los cinco principales cereales producidos en el mundo después del trigo, maíz, arroz y cebada, debido a que este cultivo es bastante resistente a la sequía y tolerante a las altas temperaturas. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), estimó que la producción mundial de sorgo en el período 2020–2021 fue alrededor de los 61.62 millones de toneladas (MT). Aproximadamente 48% de la producción mundial de sorgo, se utiliza como pienso y 42% se destina para consumo humano. Su producción se centra en países de África occidental y central, siendo Nigeria (6.9 MT) y Sudán (5.0 MT) los principales productores, pero este cereal es de los más extendidos en el continente debido a que es considerado un alimento básico esencial. En la región de Asia, la producción de sorgo se centra en dos países, China (3.55 MT) e India (3.85 MT), los cuales producen el 94% del total en esta región. En América el principal país productor es Estados Unidos (9.474 MT), seguido de México (4.5 MT), Argentina (3.2 MT) y Brasil (2.1 MT) (Badigannavar *et al.*, 2016; Teferra & Awika, 2019; Treviño-Salinas *et al.*, 2021).

En las regiones de África y Asia gran parte del sorgo se utiliza para el consumo humano, debido a la escasez de alimentos y el tipo de clima que favorece su producción. En América se utiliza principalmente para la alimentación animal y en la industria de alcoholes para producir etanol. En México, el sorgo se utiliza para la alimentación de los animales; sin embargo, la producción de alimentos a base de sorgo para consumo humano mejora el mercado y los ingresos de los agricultores, debido a los bajos costos de producción (de Morais *et al.*, 2017; McGinnis & Painter, 2020). En la Figura 1, se observa la tendencia en producción y consumo humano de sorgo en México durante el periodo del 2010 al 2019 (FIRA 2019, SIAP 2020). El sorgo puede clasificarse en tres tipos: sorgo forrajero (utilizado para alimentación animal), sorgo granífero (utilizado para alimentación

humana) y sorgo escobero (utilizado para la elaboración de fibras y escobas) (Nieblas *et al.*, 2016; Treviño-Salinas *et al.*, 2021).



**Figura 1.** Producción y consumo de sorgo en México de 2010 a 2019 (FIRA 2019, SIAP 2020).

**Figure 1.** Sorghum production and consumption in Mexico 2010-2019 (FIRA 2019, SIAP 2020).

El sorgo tiene un valor nutricional alto, debido a la gran cantidad de nutrientes que presenta, los cuales pueden dividirse en tres categorías principales: a) macronutrientes, b) micronutrientes y c) compuestos bioactivos (Serna-Saldivar & Hernández, 2020; Rashwan *et al.*, 2021). Macronutrientes son los nutrientes de los alimentos que consumimos en mayor cantidad y que aportan energía, como proteínas, carbohidratos y lípidos. Los micronutrientes son sustancias que necesitamos en pequeñas cantidades y no aportan energía, pero son esenciales para el buen funcionamiento de nuestro organismo, entre estos se incluyen los minerales y vitaminas. Los compuestos bioactivos son aquellos que, tras su ingesta, brindan efectos benéficos a la salud del consumidor; por ejemplo, la prevención de enfermedades crónicas (hipertensión, diabetes, obesidad). Desde el punto de vista químico estos compuestos poseen diversas estructuras y en el sorgo abundan los compuestos fenólicos, destacando los ácidos fenólicos, luteolinidinas y las procianidinas (Girard & Awika, 2018; Cabrera-Ramírez *et al.*, 2020; McGinnis & Painter, 2020).

La composición química y valor nutritivo del sorgo puede cambiar entre las diversas variedades que existen (de Morais *et al.*, 2017; Sorour *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2018) debido a la genética y condiciones medioambientales donde es cultivado. El contenido y tipo de proteínas, carbohidratos, lípidos y compuestos fenólicos otorgan al sorgo las facilidades para poder desarrollar diversos tipos de

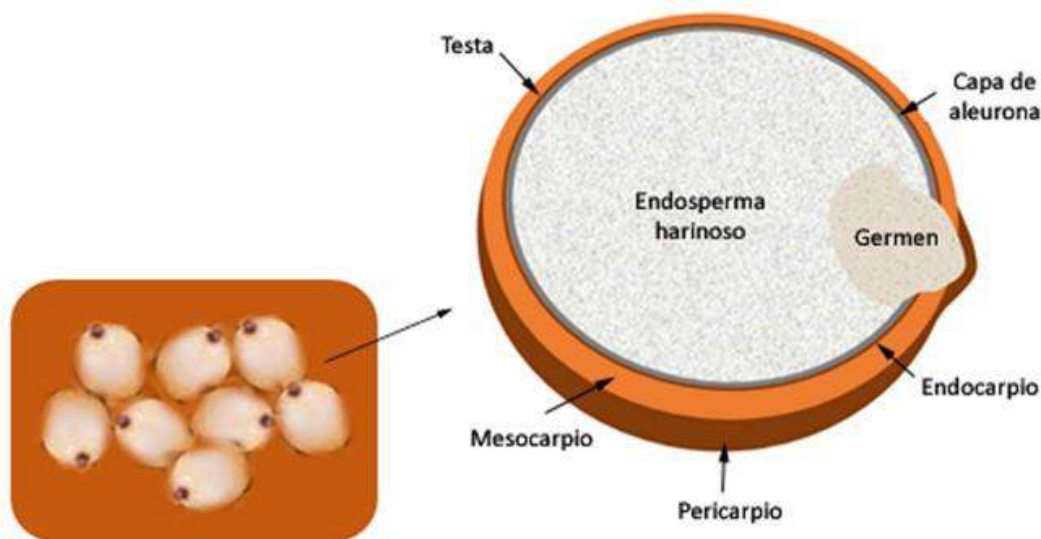
alimentos como los productos de panificación (pan, pasteles, galletas, pastas) e inclusive algunas bebidas, tanto alcohólicas como no alcohólicas. La incorporación del sorgo en alimentos susceptibles de consumo humano beneficia su salud debido a las propiedades funcionales como acción antioxidante, antidiabética, entre otras.

## 1. Composición química del sorgo

En la Tabla 1 se muestra la composición aproximada de los componentes mayoritarios del sorgo, así como de vitaminas y minerales. A continuación, se detalla la localización anatómica, en el grano, de cada uno de estos, además de otros compuestos bioactivos presentes.

### *Proteínas*

Las proteínas del sorgo se encuentran distribuidas en todo el grano y se clasifican en kafirinas (prolaminas), glutelinas, albúminas y globulinas. Las kafirinas y glutelinas son las proteínas de reserva del endospermo y las albúminas y globulinas son las proteínas de reserva que más abundan en el germen (Figura 2). Las kafirinas representan del 70 al 80% de las proteínas totales en el grano y se dividen en  $\alpha$ -Kafirinas (80%) que tienen un peso molecular de 25 a 23 kDa,  $\beta$ -Kafirinas (8 a 13%) con pesos moleculares de 16, 18, and 20 kDa,  $\gamma$ -Kafirinas (9 a 21%) con pesos moleculares entre 20 y 28 kDa y en menor proporción,  $\delta$ -Kafirinas con un peso molecular de 13 kDa. Las kafirinas están estrechamente relacionadas con la calidad y digestibilidad del sorgo y los alimentos que se derivan de este cereal (Badigannavar *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018; Balandrán-Quintana *et al.*, 2019; Castro-Jácome *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2021).



**Figura 2.** Estructura del grano de sorgo (Obra: Creación de los autores).

**Figure 2.** Structure of sorghum grain (Artwork: Authors creation).

## Carbohidratos

El almidón es el carbohidrato más abundante del sorgo, seguido de la fibra y los azúcares solubles. El almidón constituye el 79% del peso del grano, está compuesto de 70 a 80 % de amilopectina y 20 a 30 % de amilosa; estos porcentajes se ven afectados por factores ambientales y genéticos. En cuanto al contenido de fibra, el 6.5 a 9.5% corresponde a fibra insoluble y sólo el 0.4–2.7% corresponde a fibra soluble, los pentosanos (arabinoxilanos) representan el componente predominante de la fibra (2.9%), seguido de hemicelulosa (2.2%), lignina (1.6%) y celulosa (1.5%). El almidón se localiza en el endospermo y la fibra en el salvado, el cual está constituido por las cinco capas más externas del grano que son, el pericarpio, mesocarpio, endocarpio, testa y capa de aleurona, como se muestra en la Figura 2 (Awika, 2017; Serna Saldívar & Hernández, 2020).

## Lípidos

Los lípidos en el grano de sorgo están distribuidos en el germen (76.2%), endospermo (13.2%) y pericarpio (10.6%) (Tabla 1 y Figura 2). Los triacilglicérolos representan el 90%, siendo los ácidos linoleico, oleico y palmítico los más abundantes y en concentraciones más bajas están los ácidos mirístico y palmitoleico. El sorgo también presenta un alto contenido de ceras lipídicas (2.0 mg/g de grano), las cuales se componen de aldehídos grasos (44 a 55%), policosanoles (37 a 44%), ácidos grasos (4 a 8%), hidrocarburos (0.5 a 0.1%), ésteres de cera (1.4%) y triacilglicérolos (0.3 a 0.4%) (Awika, 2017; Hums *et al.*, 2018; Vanhercke *et al.*, 2019; Treviño-Salinas *et al.*, 2021).

## Vitaminas y minerales

El sorgo es una buena fuente de vitaminas, notablemente predominan las del tipo B (0.096 a 3.688 mg/100 g del grano), también aporta vitaminas A, D, E y K. Algunas variedades que poseen endospermo amarillo contienen además  $\beta$ -caroteno y los germinados de sorgo tienen vitamina C. El sorgo contiene más de 20 minerales, entre los que abundan está el potasio (363 mg/100 g), fósforo (289 mg/100 g), magnesio (165 mg/100 g), calcio (13 mg/100 g), selenio (12.2 mg/100 g), hierro (3.36 mg/100 g) y zinc (1.67 mg/100 g); los restantes minerales (sodio, cobre, manganeso) se encuentran en menores concentraciones (0.284 a 2 mg/100 g). Las vitaminas en el grano de sorgo se localizan en la parte del endospermo y germen, mientras que los minerales se localizan principalmente en el pericarpio, testa y capa de aleurona (Tabla 1).

**Tabla 1.** Composición del grano de sorgo.

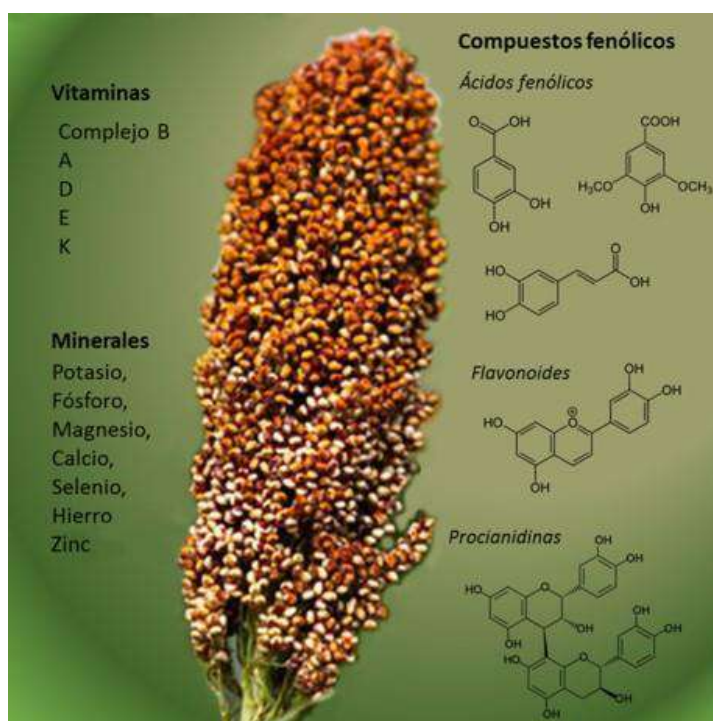
**Table 1.** Sorghum grain composition.

Nutriente	g/100 g
Proteína	13
Carbohidratos (almidón)	75
Fibra dietaria total	6.3
Lípidos	3.3
Minerales (K,P,Mg,Ca,Se, Fe, Zn)	<1.0
Vitaminas (A, D, E, K)	<0.5

(Fuente: Althwab *et al.*, 2015)

## Compuestos fenólicos

El sorgo es una gran fuente de compuestos bioactivos, en particular los ácidos fenólicos (ácidos siríngico, protocatecuico, cafeico, *p*-cumárico y sinápico) que son derivados del ácido benzoico o cinámico, y flavonoides (apigeninidina, apigeninidina 5-glucósido, luteolinidina, luteolinidina 5-glucósido y 3-desoxiantocianidinas) los cuales se caracterizan por dos anillos de fenilo y un anillo heterocíclico que se diferencian por la posición y el tipo de grupos funcionales. El sorgo contiene altas concentraciones de procianidinas, conocidas también como proantocianidinas o taninos condensados. Las procianidinas son oligómeros o polímeros formados de unidades de (-)-epicatequina y (+)-catequina (Figura 3). Las variedades de sorgo con testa pigmentada alcanzan altos niveles de procianidinas, arriba del 5% de su peso seco (McCallum & Walker, 1990). En algunos casos, se han llegado a reportar concentraciones de procianidinas, entre 7 y 8%, para variedades de sorgo con testa roja (Waniska, 2000). Este valor es alto, ya que extractos ricos en procianidinas obtenidos de semilla de uva alcanzan concentraciones de 5 al 12% del peso total.



**Figura 3.** Micronutrientes y compuestos bioactivos más abundantes en el sorgo (Obra: creación de los autores).

**Figure 3.** Most abundant micronutrients and bioactive compounds in sorghum (Artwork: authors creation).

Las semillas de uva representan uno de los tejidos vegetales con mayor contenido de procianidinas (Nakamura *et al.*, 2003). Es conocido que las variedades de sorgo con testas pigmentadas (rojo, negro, café) y pericarpio grueso tienen mayor contenido de fenoles, ya que es en las capas externas que constituyen el salvado donde más se concentran (Dykes *et al.*, 2005). El contenido de compuestos fenólicos presentes en el sorgo dependerá de la variedad y es el aspecto más beneficioso del mismo, ya que, gracias a estos compuestos, el sorgo puede ser utilizado en la elaboración de alimentos funcionales. Los alimentos con propiedades funcionales han tenido efecto en la prevención del

cáncer y enfermedades cardiovasculares, así como la reducción de la inflamación crónica y el estrés oxidativo (Przybylska-Balcerek *et al.*, 2019; Abah *et al.*, 2020; Espitia-Hernández *et al.*, 2020; Punia *et al.*, 2021).

La capacidad antioxidante de las procianidinas de sorgo es mayor a la de otros cereales, además de ser mucho más efectivas que los compuestos fenólicos simples en la captación de radicales libres (Luo *et al.*, 2020; Palacios *et al.*, 2021). Las procianidinas de sorgo tienen características estructurales diferentes a otras procianidinas, como aquellas de manzana, cacao y uva, aunque todas son de tipo B. Las procianidinas de sorgo se distinguen por estar constituidos por monómeros de (-) -epicatequina como unidad de extensión y (+)-catequina como unidad terminal, a diferencia de las procianidinas de manzana y cacao que están constituidos principalmente por unidades de (-) epicatequina. En las procianidinas de uva predominan las estructuras galato (galato de epigalocatequina y galato de galocatequina). Estas diferencias en la estructura de las procianidinas de sorgo le dan propiedades diferentes y han sido poco estudiadas (Mendoza-Wilson *et al.*, 2020).

## 2. Rearreglo estructural e interacciones de los compuestos de sorgo y su impacto en las propiedades nutricionales funcionales y bioactivas

Los cuerpos proteicos de las kafirinas poseen una capa externa compuesta principalmente de  $\beta$ - y  $\gamma$ -kafirinas entrecruzadas mediante puentes disulfuro y un interior comprendido predominantemente de  $\alpha$ -kafirinas (Labuschagne, 2018; Shah *et al.*, 2021). Este rearreglo que adoptan las kafirinas entre sí y las interacciones que establecen con el almidón determinan su baja digestibilidad y pobres propiedades funcionales, ya que las  $\alpha$ -kafirinas, que son la forma más digerible y abundante, quedan atrapadas en una red polimérica que las vuelve poco accesibles (Labuschagne, 2018). La digestibilidad de las kafirinas disminuye aún más durante el cocinado por sus interacciones adicionales con las procianidinas y la fibra, que disminuyen su solubilidad e incrementan su resistencia a ser digeridas por las proteasas como pepsina (Badigannavar *et al.*, 2016). Debido a estos efectos, compuestos como las procianidinas, son etiquetadas como factores antinutricionales.

Aunque estas interacciones y rearreglo estructural entre los compuestos químicos del sorgo, inicialmente conducen a propiedades nutricionales y funcionales negativas, desde el punto de vista de bioactividad podrían ser propiedades benéficas y relevantes. Al respecto, una de las principales ventajas del sorgo como cultivo saludable es su mayor proporción de componentes de almidón resistentes y de digestión lenta en comparación con otros cereales. Esta propiedad del sorgo permite reducir la hiperglicemia postprandial en seres humanos y podría usarse para reducir la ingesta total de calorías de los alimentos elaborados con sorgo para el consumo humano (Teferra & Awika, 2019).

Los complejos formados entre kafirinas y procianidinas de sorgo pueden tener aplicaciones en múltiples áreas y estas dependerán de la proporción en que se encuentren las distintas especies de kafirinas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ). Dadas las características de los complejos kafirinas-procianidinas de ser resistentes a la digestión enzimática y tener baja biodisponibilidad, se espera que estos podrían proteger de manera *in situ* el sistema gastrointestinal, contra la acción de oxidantes para evitar el desarrollo de enfermedades de origen oxidativo. Por otra parte, el uso de estos complejos en el

desarrollo de películas comestibles, podrían brindar protección contra la oxidación de alimentos (Baladrán-Quintana *et al.*, 2019; Carmelo-Luna, *et al.*, 2020).

### 3. Propiedades nutricionales y funcionales de alimentos a base de sorgo

El creciente desarrollo de la industria alimentaria supone la innovación y creación de nuevos productos alimenticios como son los elaborados a partir del sorgo. No obstante, también representa uno de los mayores desafíos debido a la presencia de los componentes considerados antinutricionales que no son exclusivos del sorgo y son comunes a todos los cereales, por ejemplo, las procianidinas (Rashwan *et al.*, 2021; Sruthi *et al.*, 2021). Sin embargo, los procesos como la germinación, la extrusión, fermentación y tratamientos térmicos (Figura 4) pueden disminuir las interacciones entre componentes al tiempo que mejoran la biodisponibilidad de otros nutrientes (Arouna *et al.*, 2020; Salazar-López *et al.*, 2020).



**Figura 4.** Diferentes procesos que disminuyen la interacción entre componentes del sorgo, resultando en una mayor biodisponibilidad de nutrientes y un mejor perfil de compuestos bioactivos (Obra: creación de los autores).

**Figure 4.** Different processes that decrease the interaction between components of sorghum, resulting in greater bioavailability of nutrients and a better profile of bioactive compounds (Artwork: authors creation).



Créditos a las imágenes (Image credits): Fermentación, Jon Sullivan - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24902148>; Tratamientos térmicos, Feral Arts <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30894812>; Germinación, <https://www.gob.mx/snics/articulos/como-se-realiza-un-ensayo-de-germinacion>

La germinación es un proceso común en el área de cereales, afecta el enriquecimiento y perfil de compuestos bioactivos debido a que conduce a la descomposición de macronutrientes como carbohidratos, lípidos y proteínas en sus formas más simples. Durante la germinación se lleva a cabo una acción de proteasas que ayudan a aumentar la digestibilidad de las proteínas. El sorgo germinado es considerado más saludable en comparación con el sorgo nativo, debido a que durante el proceso de germinación se reducen o eliminan algunos compuestos antinutricionales como las procianidinas, fitatos e inhibidores de proteasa. Lo anterior da como resultado una mejor digestibilidad de los nutrientes, así como una mayor disponibilidad de vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, incrementando la actividad antioxidante del sorgo. El tiempo y temperatura durante la germinación son factores determinantes que afectan la digestibilidad de nutrientes y la presencia de compuestos bioactivos, lo que modifica las propiedades antioxidantes del sorgo (Elkhalifa & Bernhardt, 2010; Singh *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019; Arouna *et al.*, 2020).

La harina obtenida a partir del grano de sorgo germinado posee propiedades funcionales que la hacen susceptible de utilizarse como materia prima en la elaboración de diversos productos para consumo humano. Presenta una mayor solubilidad en proteínas y una concentración de gelificación más baja, tiene más lisina y proteína más digerible debido a la degradación parcial de componentes antinutricionales, como el ácido fítico. Además, la germinación del grano para la obtención de harina da como resultado una disminución del contenido de amilosa y cambio en su color, disminuyendo la luminosidad (Yi *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2020). Algunos de los productos obtenidos a partir de harina de sorgo germinado son pan, pasta y alimentos para niños. El pan obtenido con esta harina presentó mayor volumen, cambio en el color (disminución de la luminosidad), mayor presencia de compuestos bioactivos y, como consecuencia, mayor capacidad antioxidante. En las pastas se incrementó el contenido de proteína y fibra, así como una mayor concentración de compuestos bioactivos. En las papillas para niños, se aumentó el valor nutricional del producto, así como la biodisponibilidad de minerales (Kouton *et al.*, 2017; Paiva *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2019; Cardone *et al.*, 2021). La utilización de este tipo de harina obtenida a partir del grano de sorgo germinado ayuda a mejorar las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los productos donde es adicionada.

La extrusión es una tecnología de procesamiento de alimentos ampliamente utilizada, ya que alarga la vida de anaquel debido a las altas temperaturas, alta presión y alta fuerza de corte, usadas durante el proceso. Adicionalmente, ocurre una menor destrucción de nutrimentos y mejora la digestibilidad. El proceso de extrusión incrementa el potencial del sorgo como materia prima en la elaboración de diversos productos (Galdeano *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020). La aplicación del proceso de extrusión, para la obtención de harinas pre-gelatinizadas (Arbex *et al.*, 2018; de Sousa *et al.*, 2018) y cereales instantáneos (Anuniação *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2018), con diferentes propiedades de sabor y textura, modifica sus propiedades fisicoquímicas, sensoriales y funcionales, por ello esta tecnología de procesamiento se considera adecuada para el grano de sorgo. Algunos de los alimentos obtenidos a partir de la extrusión del sorgo, incluyendo pastas (Alavi *et al.*, 2019), pasteles (Cayres *et al.*, 2020), galletas (Yu *et al.*, 2020), bebidas (Anuniação *et al.*, 2018; Queiroz *et al.*, 2018) y chips (Devi *et al.*, 2013), presentaron una mejora en sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales, como se muestra en

la Tabla 2. Dentro de las propiedades que se vieron beneficiadas fueron la textura, presentaron mayor contenido proteico, presencia de fibra dietética, vitaminas y una mayor concentración de compuestos fenólicos. Además, las propiedades sensoriales como aceptación, apariencia, aroma, sabor y olor fueron mejoradas al incluir sorgo en su formulación. Otra de las ventajas, además de realzar propiedades fisicoquímicas y funcionales al aplicar la tecnología de extrusión, es que se pueden mezclar ingredientes uniformemente, dar cocción y forma deseada al producto (Yu *et al.*, 2020).

La fermentación es otra de las tecnologías aplicadas para la obtención de productos a base de sorgo. La fermentación es un proceso usado tradicionalmente para aumentar la vida útil de una gran variedad de productos alimenticios perecederos, como las bebidas y productos de panificación, los cuales forman parte de la dieta humana. La fermentación tiene como objetivo: la diversificación de sabores, aromas y texturas; la preservación del alimento a través de ácido láctico, etanol y ácido acético; el enriquecimiento de sustratos alimenticios con proteína, aminoácidos, ácidos grasos esenciales y vitaminas, y la disminución de los tiempos de cocinado (Hugenholtz, 2013). Algunos alimentos obtenidos por este proceso a partir del grano de sorgo son el pan de masa fermentada (Olojede *et al.*, 2020), el cual presentó una textura mejorada que propició una mayor aceptación por parte del consumidor, así como una mejora en las cualidades nutricionales (contenido proteico y fibra cruda). Otros productos son las bebidas, como la elaborada por Gallardo *et al.*, (2013), que fue libre de gluten, representando una opción para las personas con enfermedad celiaca. Bebidas tradicionales “Obiolor” y “Pito” presentaron un alto contenido proteico y vitamínico (Ajiboye *et al.*, 2014; Sawadogo-Lingani *et al.*, 2021). La bebida elaborada por Sun *et al.*, (2020) presentó un alto contenido en compuestos bioactivos (fenoles, flavonoides).

La aplicación de tratamientos térmicos para llevar a cabo la cocción de productos derivados del sorgo como pan y pasteles (Marston *et al.*, 2016), muffin (Poquette *et al.*, 2014), chips (Jiang *et al.*, 2018), sorgo tostado para la producción de té (Xiong *et al.*, 2019), salchichas (Slima *et al.*, 2018), influye tanto en las propiedades fisicoquímicas, aumentando la extensibilidad de las masas, el volumen del producto, presencia de compuestos bioactivos, como en la mejora de sus características nutricionales y extensión de su vida útil. En uno de los tratamientos térmicos, la nixtamalización, se incluye el uso de bases duras. Este proceso requiere una cocción del grano en una solución de  $\text{Ca(OH)}_2$  (10kg por cada 2 kg de harina de sorgo), durante 20 a 45 minutos, dejarlo reposar por 8 a 24 horas y posteriormente lavarlo para eliminar el álcali y el pericarpio residuales. La nixtamalización produce cambios en las propiedades estructurales de los productos de sorgo (harina), aumentando la bioaccesibilidad de las proteínas, mejorando así su valor nutritivo (Gaytán-Martínez *et al.*, 2017; Díaz *et al.*, 2019; Cabrera-Ramírez *et al.*, 2020). Sin embargo, para poder desarrollar un alimento a base de sorgo es necesario conocer sus propiedades estructurales y funcionales (Adebo, 2020; Cayres *et al.*, 2020).

#### **4. Propiedades bioactivas de alimentos a base de sorgo**

El sorgo se ha convertido en una alternativa para sustituir parcial o totalmente al trigo u otros cereales en productos de panadería innovadores para el consumo humano. Además, el sorgo tiene un gran potencial para ser utilizado como ingrediente funcional en el desarrollo de nuevos productos por su alto contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos (Tabla 2). La presencia de

compuestos bioactivos en el sorgo otorgan beneficios a la salud relacionados con propiedades funcionales como la actividad antioxidante, antihipertensiva, antidiabética y antiobesidad, entre otras (Figura 5) (Taylor, *et al.*, 2006; Awika, 2017; Xu *et al.*, 2021).

El proceso antioxidante consiste en la interrupción de la reacción de los radicales libres, mediante la transferencia de átomos de hidrógeno o electrones desde los compuestos bioactivos hacia los radicales, lo que conduce a la formación de compuestos más estables. Los antioxidantes captadores de oxígeno incluyen, ácidos fenólicos, flavonoides, procianidinas y carotenoides presentes en el sorgo (Stefoska-Needham *et al.*, 2015; Przybylska-Balcerek *et al.*, 2019). Productos alimenticios elaborados a partir de sorgo, como cereal para desayuno y pastas (Anunciação *et al.*, 2017; Lopes *et al.*, 2018; Palavecino *et al.*, 2019), presentaron altos niveles de compuestos bioactivos (fenoles, flavonoides y tocoferoles) lo que incrementó su actividad antioxidante contra radicales como ABTS (2,2'-azino-bis ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) y DPPH (2,2-difenil-1-picrylhidrazil). En bebidas tanto alcohólicas y no alcohólicas el resultado de utilizar sorgo como materia prima para su formulación dio bebidas con alta inhibición de radicales ABTS, DPPH, ROS (OH, O<sub>2</sub><sup>·</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), por su elevado contenido de compuestos fenólicos (Ajiboye *et al.*, 2014; Queiroz *et al.*, 2018; Xiong *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020; Sawadogo-Lingani *et al.*, 2021).

El sorgo también ha sido utilizado en la obtención de productos sin gluten para personas con enfermedad celíaca y otras intolerancias al trigo (Stefoska-Needham *et al.*, 2015; Przybylska-Balcerek *et al.*, 2019; Pezzali *et al.*, 2020). La celiaquía o enfermedad celíaca es un proceso frecuente de naturaleza autoinmune y con afectación sistémica. La celiaquía es la única enfermedad dentro de un amplio grupo de procesos autoinmunitarios, producida por una intolerancia permanente al gluten, que aparece en individuos genéticamente susceptibles. La celiaquía afecta aproximadamente al 1 al 2 % de la población general y afecta casi por igual a todas las razas (Lundin & Wijmenga, 2015; Montealegre, *et al.*, 2018). Algunos de los productos que han sido elaborados para personas con celiaquía a partir de sorgo son: panes, pasteles, bebidas alcohólicas (cerveza), pastas, galletas entre otros (Gallardo *et al.*, 2013; Chávez *et al.*, 2018; Cayres *et al.*, 2020).

Las enfermedades transmitidas por alimentos representan un problema mundial, estas son causadas por microorganismos que causan el deterioro de los alimentos. Los microorganismos más comunes que causan las enfermedades transmitidas por alimentos son: *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp*, *Listeria monocytogenes*, entre otros. El sorgo presenta actividad antimicrobiana contra estos microorganismos, esta propiedad está relacionada principalmente con la presencia de compuestos fenólicos como ácidos fenólicos, flavonoides y procianidinas, así como glicéridos de fenilpropano, y fenolamidas, que son compuestos fenólicos que se han encontrado en el grano de sorgo. Además de los compuestos fenólicos, la presencia de proteína hidrolizada del sorgo es responsable de la actividad antimicrobiana contra bacterias tanto Gram negativas como positivas. Esta actividad antimicrobiana presente en las proteínas hidrolizadas de sorgo depende directamente del tamaño, secuencia y composición de aminoácidos. Por lo mencionado, el sorgo y los productos obtenidos de él son susceptibles de ser utilizados como ingredientes funcionales en diferentes alimentos, ayudando a retardar su deterioro debido a la acción antimicrobiana de sus compuestos bioactivos (Adebolu *et al.*, 2018; Xiong *et al.*, 2019; Espitia-Hernández *et al.*, 2020; Farida *et al.*, 2020; Salih *et al.*, 2020; Garzón *et al.*, 2022).

**Tabla 2.** Alimentos a base de sorgo características fisicoquímicas, sensoriales y sus propiedades funcionales.**Table 2.** Sorghum-based foods physicochemical, sensorial characteristics and their functional properties

<b>Alimento</b>	<b>Método de obtención</b>	<b>Propiedades fisicoquímicas y sensoriales</b>	<b>Propiedades funcionales</b>	<b>Referencia</b>
Chips	Extrusión	Mejor textura y alta aceptabilidad del consumidor		Devi, N. L., Shobha, S., Tang, X., Shaur, S. A., Dogan, H., & Alavi, S. (2013)
Bebida alcohólica	Fermentación	Buenas características sensoriales (color y sabor)	Producto libre de gluten	Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., & Saucedo, O. (2013)
Muffin	Tratamiento térmico	Buena calidad nutricional	Control de niveles de glucosa e insulina	Poquette, N. M., Gu, X., & Lee, S. O. (2014)
Hojuelas, pasta, galletas		Alimento previamente preparado	Prevención y control de la diabetes	Prasad, M. P. R., Rao, B. D., Kalpana, K., Rao, M. V., & Patil, J. V. (2015)
Pan y pastel	Método térmico	Mayor volumen del producto y buena aceptación por el consumidor	Producto libre de gluten	Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016)
Cereal para desayuno	Extrusión	Buenas características sensoriales	Alta capacidad antioxidante	Anuniação, P. C., de Morais Cardoso, L., Gomes, J. V. P., Della Lucia, C. M., Carvalho, C. W. P., Galdeano, M. C., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2017)
Bebida	Extrusión	Alto contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos (taninos)	Reducción de la glucemia posprandial	Anuniação, P. C., Cardoso, L. D. M., Queiroz, V. A. V., de Menezes, C. B., de Carvalho, C. W. P., Pinheiro-Sant'Ana, H. M., & Alfenas, R. D. C. G. (2018)

**Tabla 2 (Continuación).** Alimentos a base de sorgo características fisicoquímicas, sensoriales y sus propiedades funcionales.  
**Table 2 (Cont.)** Sorghum-based foods physicochemical, sensorial characteristics and their functional properties

<b>Alimento</b>	<b>Método de obtención</b>	<b>Propiedades fisicoquímicas y sensoriales</b>	<b>Propiedades funcionales</b>	<b>Referencia</b>
Salchichas con polisacárido de sorgo		Extiende vida útil	Mejora la estabilidad a la oxidación	Slima, S. B., Ktari, N., Trabelsi, I., Moussa, H., Makni, I., & Salah, R. B. (2018)
Harina	Extrusión	Alto contenido de compuestos bioactivos y fibra	Reducción de obesidad en ratas	Arbex, P. M., de Castro Moreira, M. E., Toledo, R. C. L., de Morais Cardoso, L., Pinheiro-Sant'ana, H. M., dos Anjos Benjamin, L., & Martino, H. S. D. (2018).
Chips	Tratamiento térmico	Producto rico en proteínas	Índice glucémico intermedio	Jiang, H., Hettiarachchy, N. S., & Horax, R. (2018).
Pan	Tratamiento térmico	Mejora en volúmenes del pan y la extensibilidad de las masas	Producto libre de gluten	Vasquez-Lara, F., Soto Padilla, D., Cordero Fernández, D. L., Granados Nevárez, M. D. C., Islas Rubio, A. R., Verdú Amat, S. Grau Meló, R., & Barat Baviera, J. M. (2018)
Cereal para desayuno	Extrusión	Mayor contenido proteico y de fibra	Acción antiinflamatoria y disminución del estrés oxidativo en humanos	Lopes, R. D. C. S. O., de Lima, S. L. S., da Silva, B. P., Toledo, R. C. L., de Castro Moreira, M. E., Anunciação, P. C., & Martino, H. S. D. (2018).
Bebida en polvo	Extrusión	Bebida baja en calorías	Actividad antioxidante	Queiroz, V. A. V., da Silva Aguiar, A., de Menezes, C. B., de Carvalho, C. W. P., Paiva, C. L., Fonseca, P. C., & da Conceição, R. R. P. (2018)

**Tabla 2 (Continuación).** Alimentos a base de sorgo características fisicoquímicas, sensoriales y sus propiedades funcionales.  
**Table 2 (Cont.)** Sorghum-based foods physicochemical, sensorial characteristics and their functional properties

<b>Alimento</b>	<b>Método de obtención</b>	<b>Propiedades fisicoquímicas y sensoriales</b>	<b>Propiedades funcionales</b>	<b>Referencia</b>
Té	Tratamiento térmico (grano tostado)	Alto contenido de compuestos bioactivos y volátiles	Actividad antioxidante	Xiong, Y., Zhang, P., Luo, J., Johnson, S., & Fang, Z. (2019).
Pasta (espagueti y macarrones)	Extrusión	Alta calidad y buenas características fisicoquímicas		Alavi, S., Ruan, S., Adapa, S. S., Joseph, M., Lindshield, B., & Chilukuri, S. (2019)
Sorgo	Extrusión	Alimento rico en fibra dietética, vitaminas y compuestos fenólicos	Buena alternativa para controlar la obesidad en hombres con sobrepeso	Anunção, P. C., de Moraes Cardoso, L., Alfenas, R. D. C. G., Queiroz, V. A. V., Carvalho, C. W. P., Martino, H. S. D., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2019)
Pasta		Producto libre de gluten	Actividad antioxidante	Palavecino, P. M., Ribotta, P. D., León, A. E., & Bustos, M. C. (2019)
Pasteles sabor chocolate y naranja	Harina utilizada obtenida por extrusión	Buena calidad sensorial	Producto libre de gluten	Cayres, C. A., Ascheri, J. L. R., Couto, M. A. P. G., Almeida, E. L., & Melo, L. (2020).
Harina de sorgo nixtamalizada	Nixtamalización	Mejor valor nutritivo	Mayor bioaccesibilidad de proteínas	Cabrera-Ramírez, A. H., Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Morales-Sánchez, E., Campos-Vega, R., & Gaytán-Martínez, M. (2020).

**Tabla 2 (Continuación).** Alimentos a base de sorgo características fisicoquímicas, sensoriales y sus propiedades funcionales.  
**Table 2 (Cont.)** Sorghum-based foods physicochemical, sensorial characteristics and their functional properties

Alimento	Método de obtención	Propiedades fisicoquímicas y sensoriales	Propiedades funcionales	Referencia
Harina	Extrusión	Alto contenido de compuestos bioactivos	Reducción del índice de masa corporal y el peso del hígado de ratas obesas.	de Sousa, A. R., de Castro Moreira, M. E., Toledo, R. C. L., dos Anjos Benjamin, L., Queiroz, V. A. V., Veloso, M. P., & Martino, H. S. D. (2018)
Té	Fermentación	Alto contenido de compuestos fenólicos	Buena actividad antioxidante	Sun, H., Wang, H., Zhang, P., Ajlouni, S., & Fang, Z. (2020).
Pan de masa fermentada	Fermentación	Mejores características de textura, nutricionales y sensoriales		Olojede, A. O., Sanni, A. I., & Banwo, K. (2020)
Bebida	Fermentación	Cerveza rica en vitaminas del grupo B (tiamina, ácido fólico, riboflavina, ácido nicotínico) y aminoácidos esenciales (lisina).	Buena actividad antioxidante	Sawadogo-Lingani, H., Owusu-Kwarteng, J., Glover, R., Diawara, B., Jakobsen, M., & Jespersen, L. (2021).
Galletas	Harina extrudida	Mejora características sensoriales	Producto con mejor calidad nutrimental	Xu, J., Wang, W., & Zhao, Y. (2021)
Bebidas tradicionales "Obiolor" "Pito"	Fermentación	Alto contenido proteico	Actividad antioxidante y las capacidades para prevenir la oxidación de lípidos y proteínas	Ajiboye, T. O., Iliasu, G. A., Adeleye, A. O., Abdussalam, F. A., Akinpelu, S. A., Ogunbode, S. M., & Oloyede, O. B. (2014); Sawadogo-Lingani, H., Owusu-Kwarteng, J., Glover, R., Diawara, B., Jakobsen, M., & Jespersen, L. (2021).



**Figura 5.** Propiedades bioactivas y beneficios a la salud humana de alimentos elaborados a base de sorgo (Obra: creación de los autores).

**Figure 5.** Bioactive properties and benefits to human health of foods made from sorghum (Artwork: authors creation).

Créditos a las imágenes (Image credits): Pan, Rainer Zenz,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=597239>; muffin, National Cancer Institute, Renee

Comet <https://visualsonline.cancer.gov/details.cfm?imageid=2609>; pasta, De rjp from London, UK - Fusilli,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2936775>.

La inflamación es una respuesta inmune innata del cuerpo, la cual es inducida por la estimulación de sustancias extrañas o estresores estériles celulares que generalmente surgen de una lesión o infección. Sin embargo, la respuesta inflamatoria no regulada puede conducir a enfermedades autoinmunes, cáncer, enfermedades musculares y esqueléticas, y causar daño a otros sistemas corporales como el tracto gastrointestinal, los sistemas respiratorio y circulatorio y la función de los órganos reproductivos (Stefoska-Needham *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2020). La actividad antiinflamatoria del sorgo, al igual que las actividades funcionales mencionadas anteriormente (antimicrobiana y antioxidante), está relacionada con la presencia de compuestos bioactivos como los compuestos fenólicos y con la presencia de hidrolizados de kafirinas (Castro-Jácome *et al.*, 2021). Cabe destacar que esta propiedad funcional se ve incrementada cuando el sorgo es sometido a procesos térmicos como la extrusión, la cual aumenta el contenido de compuestos bioactivos, aumentando la acción antiinflamatoria (Salazar- Lopez *et al.*, 2016; Sullivan *et al.*, 2018).

Varios estudios han demostrado propiedades antidiabéticas y antiobesidad del consumo de productos elaborados de sorgo, desde harina (Arbex *et al.*, 2018; de Sousa *et al.*, 2018), hasta productos como muffin (Poquette *et al.*, 2014), galletas, pasta (Prasad *et al.*, 2015), chips (Jiang *et al.*, 2018), cereal (Anunção *et al.*, 2019) y bebidas (Anunção *et al.*, 2018). La actividad funcional se presentó en



ensayos *in vivo* donde se demostró que el consumo de sorgo tiene el potencial de reducir el porcentaje de grasa corporal, la cual juega un papel importante en el desarrollo y origen de muchas enfermedades crónicas (Simnadis *et al.*, 2016; Arouna *et al.*, 2020). El consumo de productos elaborados a base de sorgo presenta un alto contenido de fibra, en comparación con los alimentos obtenidos de otros cereales, lo que se relaciona con la liberación gradual de glucosa en sangre y la insulina, presentando un índice glucémico intermedio después de haber ingerido el alimento. Esto sugiere que la matriz de nutrientes presentes en el grano de sorgo, juega un papel sinérgico en la generación de resultados positivos sobre la salud del consumidor. Esto se atribuye a que los nutrientes presentes en el sorgo mantienen su bioactividad, incluso después de haber sido procesado y transformado en diferentes productos alimenticios (Simnadis *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2018).

Finalmente, es importante destacar que se están realizando algunos esfuerzos para el mejor aprovechamiento de algunos de los compuestos considerados como factores antinutricionales, entre ellos, los complejos formados por procianidinas y kafirinas. Al respecto, se ha encontrado que la  $\gamma$ -kafirina es la especie de polipéptido de kafirina con mayor contenido de prolina y también es la que se une en mayor proporción y con mayor fuerza a las procianidinas. Debido a esta característica, las biopelículas formadas por una combinación de procianidinas y  $\gamma$ -kafirina, poseen mayor vida de anaquel. Además, los alimentos a base de sorgo que combinan alto contenido de  $\gamma$ -kafirina y procianidinas, se perfilan como una alternativa en la dieta para reducir la ingesta de calorías y reducir la incidencia de obesidad (Taylor *et al.*, 2007). Las biopelículas formuladas con kafirinas y procianidinas de sorgo, también han mostrado actividad antimicrobiana, por lo que se consideran una promesa como películas comestibles, que además de preservar las propiedades de los alimentos brinden al consumidor beneficios en la salud (Emmambux *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2009). Existen evidencias de que nano películas comestibles elaboradas con una combinación de kafirinas, compuestos fenólicos y gelatina, mostraron potencial antimicrobiano y evitaron la pérdida de peso, firmeza y vitaminas como el ácido ascórbico, al ser aplicadas en frutos de manzana, uvas, tomates y pimientos (Bakhy *et al.*, 2018).

En específico, el potencial antioxidante de los complejos formados por kafirinas y procianidinas de sorgo, aún no ha sido bien estudiado. Trabajos previos realizados con complejos formados por proteínas de distintas fuentes (leche, albumina de suero de bovino, nueces) y diferente tipo de procianidinas (cocoa, té, café), han reportado resultados contradictorios en relación con que la actividad antioxidante de dichos complejos en algunos casos aumenta y en otros disminuye. Tales contradicciones son atribuidas al uso de diferentes métodos para estimar el potencial antioxidante. Comprender de manera fundamental el comportamiento de los complejos kafirinas-procianidinas de sorgo, desde un punto de vista científico, es esencial para futuras aplicaciones en la industria alimentaria, por lo que es necesario realizar más estudios en este contexto.

## Conclusiones y perspectivas

Además de ser el sorgo uno de los principales cereales producidos a nivel mundial y ser utilizado principalmente en alimento para animales, actualmente se han desarrollado productos destinados a la alimentación humana, debido a que el sorgo otorga buenas propiedades funcionales, como actividad antioxidante, antihipertensiva y antimicrobiana, haciendo del sorgo una materia prima de interés para seguir desarrollando alimentos a base de este grano. Asimismo, el sorgo es una excelente

opción para el tratamiento de la enfermedad celiaca. La información recopilada en esta revisión, permite ampliar el panorama acerca de los avances en las mejoras de las propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas de alimentos a base de sorgo.

## Agradecimiento

La Dra. Arely León-López agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca (número de beca 621400) otorgada en la Convocatoria Estancias Posdoctorales por México, Modalidad 1, para realizarse en la Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal del CIAD, A.C.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés con respecto al trabajo presentado en este reporte.

## 4. Referencias

- Abah, C., Ishiwu, C., Obiegbuna, J., & Oladejo, A. (2020). Sorghum Grains: Nutritional Composition, Functional Properties and Its Food Applications. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 12, 101-111. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2020/v12i530232>
- Adebo, O. A. (2020). African sorghum-based fermented foods: past, current and future prospects. *Nutrients*, 12, 1111. <https://doi.org/10.3390/nu12041111>
- Adebolu, T. A., Adediwura, D. V., & Aiyenuro, E. A. (2018). Antibacterial Activity of Sorghum “Ogi” on Diarrhoeagenic *Escherichia coli*. *Journal of Advances in Microbiology*, 12, 1-8. <https://doi.org/10.9734/IAMB/2018/44011>
- Ajiboye, T. O., Iliasu, G. A., Adeleye, A. O., Abdussalam, F. A., Akinpelu, S. A., Ogunbode, S. M., & Oloyede, O. B. (2014). Nutritional and antioxidant dispositions of sorghum/millet-based beverages indigenous to Nigeria. *Food science & nutrition*, 2, 597-604. <https://doi.org/10.1002/fsn3.140>
- Alavi, S., Ruan, S., Adapa, S. S., Joseph, M., Lindshield, B., & Chilukuri, S. (2019). Use of grain sorghum in extruded products developed for gluten-free and food aid applications. *Sorghum: State of the art and future perspectives*, 1-16. <http://dx.doi.org/10.2134/agronmonogr58.2018.0001>
- Althwab, S., Carr, T. P., Weller, C. L., Dweikat, I. M., & Schlegel, V. (2015). Advances in grain sorghum and its co-products as a human health promoting dietary system. *Food Research International*, 77, 349-359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.011>
- Anunciação, P. C., de Morais Cardoso, L., Gomes, J. V. P., Della Lucia, C. M., Carvalho, C. W. P., Galdeano, M. C., ... & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2017). Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: Sensorial acceptance and bioactive compound content. *Food Chemistry*, 221, 984-989. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.065>
- Anunciação, P. C., de Morais Cardoso, L., Alfnas, R. D. C. G., Queiroz, V. A. V., Carvalho, C. W. P., Martino, H. S. D., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2019). Extruded sorghum consumption associated with a caloric restricted diet reduces body fat in overweight men: A randomized controlled trial. *Food Research International*, 119, 693-700. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.048>

- Anunciação, P. C., Cardoso, L. D. M., Queiroz, V. A. V., de Menezes, C. B., de Carvalho, C. W. P., Pinheiro-Sant'Ana, H. M., & Alfenas, R. D. C. G. (2018). Consumption of a drink containing extruded sorghum reduces glycaemic response of the subsequent meal. *European journal of nutrition*, 57, 251-257. <https://doi.org/10.1007/s00394-016-1314-x>
- Arbex, P. M., de Castro Moreira, M. E., Toledo, R. C. L., de Moraes Cardoso, L., Pinheiro-Sant'ana, H. M., dos Anjos Benjamin, L., & Martino, H. S. D. (2018). Extruded sorghum flour (*Sorghum bicolor* L.) modulate adiposity and inflammation in high fat diet-induced obese rats. *Journal of functional foods*, 42, 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.01.010>
- Arouna, N., Gabriele, M., & Pucci, L. (2020). The impact of germination on sorghum nutraceutical properties. *Foods*, 9, 1218. <https://doi.org/10.3390/foods9091218>
- Awika, J. M. (2017). *Sorghum: Its Unique Nutritional and Health-Promoting Attributes. Gluten-Free Ancient Grains*, Woodhead Publishing, 21-54. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100866-9.00003-0>
- Badigannavar, A., Girish, G., Ramachandran, V., & Ganapathi, T. R. (2016). Genotypic variation for seed protein and mineral content among post-rainy season-grown sorghum genotypes. *The Crop Journal*, 4, 61-67. <https://doi.org/10.1016/CJ.2015.07.002>
- Bakhy, E. A., Zidan, N. S., & Aboul-Anean, H. E. D. (2018). The effect of nano materials on edible coating and films' improvement. *Int J Pharm Res Allied Sci*, 7, 20-41. <https://bit.ly/3y9GJnz>
- Balandrán-Quintana, R.R., Mendoza-Wilson, A.M., Ramos-Clamont Montfort G., Huerta-Ocampo, J.A. (2019). Plant-Based Proteins. In: *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications*. Galanakis, (pp. 97-119). <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2006>
- Cabrera-Ramírez, A. H., Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Morales-Sánchez, E., Campos-Vega, R., & Gaytán-Martínez, M. (2020). Effect of the nixtamalization process on the protein bioaccessibility of white and red sorghum flours during in vitro gastrointestinal digestion. *Food Research International*, 134, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109234>
- Cardone, G., Rumler, R., Speranza, S., Marti, A., & Schönlechner, R. (2021). Sprouting Time Affects Sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) Functionality and Bread-Baking Performance. *Foods*, 10, 2285. <https://doi.org/10.3390/foods10102285>
- Carmelo Luna, F. J., Mendoza Wilson, A. M., & Balandrán Quintana, R. R. (2020). Antiradical and chelating ability of (+)-catechin, procyanidin B1, and a procyanidin-rich fraction isolated from brown sorghum bran. *Nova scientia*, 12, 0-0. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2006>
- Castro-Jácome, T. P., Alcántara-Quintana, L. E., & Tovar-Pérez, E. G. (2020). Optimization of sorghum kafirin extraction conditions and identification of potential bioactive peptides. *BioResearch Open Access*, 9, 198-208. <https://doi.org/10.1089/biores.2020.0013>
- Cayres, C. A., Ascheri, J. L. R., Couto, M. A. P. G., Almeida, E. L., & Melo, L. (2020). Consumers' acceptance of optimized gluten-free sorghum-based cakes and their drivers of liking and disliking. *Journal of Cereal Science*, 93, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102938>
- Chávez, D., Ascheri, J., Martins, A., Carvalho, C., Bernardo, C., & Teles, A. (2018). Sorghum, an alternative cereal for gluten-free product. *Rev. chil. nutr.*, 169-177. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000300169>
- de Moraes Cardoso, L., Pinheiro, S. S., Martino, H. S. D., & Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2017). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. *Critical reviews in food science and nutrition* 57, 372-390. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.887057>
- de Sousa, A. R., de Castro Moreira, M. E., Toledo, R. C. L., dos Anjos Benjamin, L., Queiroz, V. A. V., Veloso, M. P., & Martino, H. S. D. (2018). Extruded sorghum (*Sorghum bicolor* L.) reduces

- metabolic risk of hepatic steatosis in obese rats consuming a high fat diet. *Food Research International*, 112, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.004>
- Devi, N. L., Shobha, S., Tang, X., Shaur, S. A., Dogan, H., & Alavi, S. (2013). Development of protein-rich sorghum-based expanded snacks using extrusion technology." *International Journal of Food Properties*, 16, 263-276. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.551865>
- Díaz González, D., Morawicki, R., & Mauromoustakos, A. (2019). Effect of nixtamalization treatment of three varieties of grain sorghum on the reduction of total phenolics and their subsequent enzymatic hydrolysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43, 14067. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14067>
- Dykes, L., Rooney, L. W., Waniska, R. D., & Rooney, W. L. (2005). Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Sorghum Grains of Varying Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 6813-6818. <https://doi.org/10.1021/jf050419e>
- Elkhalifa, A. E. O., & Bernhardt, R. (2010). Influence of grain germination on functional properties of sorghum flour. *Food Chemistry*, 121, 387-392. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.041>
- Emmambux, M. N., Stading, M., & Taylor, J. R. N. (2004). Sorghum kafirin film property modification with hydrolysable and condensed tannins. *Journal of Cereal Science*, 40, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.08.005>
- Espitia-Hernández, P., Chávez González, M. L., Ascacio-Valdés, J. A., Dávila-Medina, D., Flores-Naveda, A., Silva, T., Sepúlveda, L. (2020). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852389>
- Farida, K., Messaoud, B., Bernard, W., & Salah, A. (2020). Antimicrobial activity of aqueous methanolic extracts of Algerian cultivars of sorghum (L.) Moench). *Acta Scientifica Naturalis*, 7, 71-85. <https://doi.org/10.2478/asn-2020-0008>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura FIRA (2019). Panorama Agroalimentario Sorgo, 3-18.
- Galdeano, M. C., Tonon, R. V., Menezes, N. D. S., Carvalho, C. W. P. D., Minguita, A. P. D. S., & Mattos, M. D. C. (2018). Influence of milling and extrusion on the sorption properties of sorghum." *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, e2017118 <https://doi.org/10.1590/1981-6723.11817>
- Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., & Saucedo, O. (2013). Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celíacos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4, 61-74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627689006>
- Garzón, A. G., Veras, F. F., Brandelli, A., & Drago, S. R. (2022). Purification, identification and in silico studies of antioxidant, antidiabetogenic and antibacterial peptides obtained from sorghum spent grain hydrolysate. *LWT*, 153, 112414. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112414>
- Gaytán-Martínez, M., Cabrera-Ramírez, Á. H., Morales-Sánchez, E., Ramírez-Jiménez, A. K., Cruz-Ramírez, J., Campos-Vega, R., & Mendoza, S. (2017). Effect of nixtamalization process on the content and composition of phenolic compounds and antioxidant activity of two sorghums varieties. *Journal of Cereal Science*, 77, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.014>
- Girard, A. L. and J. M. Awika (2018). Sorghum polyphenols and other bioactive components as functional and health promoting food ingredients. *Journal of Cereal Science*, 84, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.009>
- Hugenholtz, J. (2013). Traditional biotechnology for new foods and beverages. *Current Opinion in Biotechnology*, 24, 155-159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.01.001>

- Hums, M. E., Moreau, R. A., Powell, M. J., & Hoyt, J. L. (2018). Extraction of surface wax from whole grain sorghum. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95, 845-852. <https://doi.org/10.1002/aocs.12088>
- Jiang, H., Hettiarachchy, N. S., & Horax, R. (2018). Physical properties and estimated glycemic index of protein-enriched sorghum based chips. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 891-898. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2993-x>
- Kouton, S. E., Amoussa Hounkpatin, W., Ballogou, V. Y., & Soumanou, M. M. (2017). Nutritional, microbiological and rheological characteristics of porridges prepared from infant flours based on germinated and fermented cereals fortified with soybean. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6, 4838-4852. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.452>
- Labuschagne, M. T. (2018). A review of cereal grain proteomics and its potential for sorghum improvement. *Journal of Cereal Science*, 84, 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.010>
- Li, A., Jia, S., Yobi, A., Ge, Z., Sato, S. J., Zhang, C., & Holding, D. R. (2018). Editing of an alpha-kafirin gene family increases digestibility and protein quality in sorghum. *Plant physiology*, 177, 1425-1438. <https://doi.org/10.1104/pp.18.00200>
- Lopes, R. D. C. S. O., de Lima, S. L. S., da Silva, B. P., Toledo, R. C. L., de Castro Moreira, M. E., Anunciação, P. C., & Martino, H. S. D. (2018). Evaluation of the health benefits of consumption of extruded tannin sorghum with unfermented probiotic milk in individuals with chronic kidney disease. *Food Research International*, 107, 629-638. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.004>
- Lundin, K. E. and C. Wijmenga (2015). Coeliac disease and autoimmune disease—genetic overlap and screening. *Nature reviews Gastroenterology & hepatology*, 12, 507-515. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2015.136>
- Luo, C., Zou, L., Sun, H., Peng, J., Gao, C., Bao, L., Sun, S. (2020). A review of the anti-inflammatory effects of rosmarinic acid on inflammatory diseases. *Frontiers in pharmacology*, 11, 153. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00153>
- Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.063>
- McCallum, J., & Walker, J. (1990). Proanthocyanidins in wheat bran. *Cereal Chem*, 67, 282-285. <https://bit.ly/3vJVyve>
- McGinnis, M. J., & Painter, J. E. (2020). Sorghum: History, use, and health benefits. *Nutrition Today*, 55, 38-44. <http://dx.doi.org/10.1097/NT.0000000000000391>
- Mendoza-Wilson, A. M., Balandrán-Quintana, R. R., & Cabellos, J. L. (2020). Thermochemical behavior of sorghum procyanidin trimers with C4–C8 and C4–C6 interflavan bonds in the reaction with superoxide anion radical and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-forming NADH-oxidase flavoenzyme. *Computational and Theoretical Chemistry*, 112912. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2020.112912>
- Montealegre, Á. R., Celada, P., Bastida, S., & Sánchez-Muniz, F. J. (2018). Acerca de la enfermedad celiaca. Breve historia de la celiacía. *Journal of Negative and No Positive Results*, 3, 980-997. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.2813>
- Nakamura, Y., Tsuji, S., & Tonogai, Y. (2003). Analysis of proanthocyanidins in grape seed extracts, health foods and grape seed oils. *Journal of health science*, 49, 45-54. <https://doi.org/10.1248/jhs.49.45>
- Nieblas Morfa, C., Gallardo Aguilar, I., Rodríguez Rodríguez, L., Carvajal Mena, N., González Chávez, J. F., & Pérez Pentón, M. (2016). Obtención de bebidas y otros productos alimenticios a partir de dos variedades de sorgo. *Centro Azúcar*, 43, 66-78. <https://bit.ly/39CpBN3>

- Olojede, A. O., Sanni, A. I., & Banwo, K. (2020). Effect of legume addition on the physiochemical and sensorial attributes of sorghum-based sourdough bread. *LWT*, 118, 108769. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108769>
- Paiva, C. L., Queiroz, V. A. V., Simeone, M. L. F., Schaffert, R. E., de Oliveira, A. C., & da Silva, C. S. (2017). Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. *Food Chemistry*, 214, 400-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.067>
- Palacios, C. E., Nagai, A., Torres, P., Rodrigues, J. A., & Salatino, A. (2021). Contents of tannins of cultivars of sorghum cultivated in Brazil, as determined by four quantification methods. *Food Chemistry*, 337, 127970. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127970>
- Palavecino, P. M., Ribotta, P. D., León, A. E., & Bustos, M. C. (2019). Gluten-free sorghum pasta: starch digestibility and antioxidant capacity compared with commercial products. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99, 1351-1357. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9310>
- Pezzali, J. G., Suprabha-Raj, A., Siliveru, K., & Aldrich, C. G. (2020). Characterization of white and red sorghum flour and their potential use for production of extrudate crisps. *Plos one*, 15, e0234940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234940>
- Poquette, N. M., Gu, X., & Lee, S. O. (2014). Grain sorghum muffin reduces glucose and insulin responses in men." *Food & function*, 5, 894-899. <https://doi.org/10.1039/C3FO60432B>
- Prasad, M. P. R., Rao, B. D., Kalpana, K., Rao, M. V., & Patil, J. V. (2015). Glycaemic index and glycaemic load of sorghum products." *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 1626-1630. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6861>
- Przybylska-Balcerek, A., Frankowski, J., & Stuper-Szablewska, K. (2019). Bioactive compounds in sorghum. *European Food Research and Technology*, 245, 1075-1080. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3207-0>
- Punia, H., Tokas, J., Malik, A., Satpal, & Sangwan, S. (2021). Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] grains. *Cereal Research Communications*, 49, 343-353. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00118-w>
- Queiroz, V. A. V., da Silva Aguiar, A., de Menezes, C. B., de Carvalho, C. W. P., Paiva, C. L., Fonseca, P. C., & da Conceição, R. R. P. (2018). A low calorie and nutritive sorghum powdered drink mix: Influence of tannin on the sensorial and functional properties. *Journal of Cereal Science*, 49, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.001>
- Rashwan, A. K., Yones, H. A., Karim, N., Taha, E. M., & Chen, W. (2021). Potential processing technologies for developing sorghum-based food products: An update and comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.087>
- Salazar-López, N. J., González-Aguilar, G. A., Rouzaud-Sáñez, O., Loarca-Piña, G., Gorinstein, S., & Robles-Sánchez, M. (2020). Sorghum bran supplementation ameliorates dyslipidemia, glucose dysregulation, inflammation and stress oxidative induced by a high-fat diet in rats. *CyTA-Journal of Food*, 18, 20-30. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1702105>
- Salih, S. A., Ahmed, K. E., Ezzdeen, L. T., & Hamza, A. A. (2020). Effect of fermentation and processing of Sorghum bicolor Grains to produce traditional Sudanese Hulu-Mur on phytochemicals and their biological activities. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 10, 076-084. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2020.10.3.0040>
- Sawadogo-Lingani, H., Owusu-Kwarteng, J., Glover, R., Diawara, B., Jakobsen, M., & Jespersen, L. (2021). Sustainable Production of African Traditional Beers with Focus on Dolo, a West African Sorghum-Based Alcoholic Beverage. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 143. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.672410>

- Serna Saldívar, S. O. and D. S. Hernández (2020). Dietary Fiber in Cereals, Legumes, Pseudocereals and Other Seeds. *Science and Technology of Fibers in Food Systems*, 87-122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00005-8>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Panorama Agroalimentario*, 6-19.
- Shah, U., Dwivedi, D., Hackett, M., Al-Salami, H., Utikar, R. P., Blanchard, C., Johnson, S. K. (2021). Physicochemical characterisation of kafirins extracted from sorghum grain and dried distillers grain with solubles related to their biomaterial functionality. *Scientific Reports*, 11, 15204. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94718-z>
- Simnadis, T. G., Tapsell, L. C., & Beck, E. J. (2016). Effect of sorghum consumption on health outcomes: a systematic review. *Nutrition reviews*, 74, 690-707. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw036>
- Singh, A., Sharma, S., & Singh, B. (2017). Effect of germination time and temperature on the functionality and protein solubility of sorghum flour. *Journal of Cereal Science*, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.003>
- Singh, A., Sharma, S., Singh, B., & Kaur, G. (2019). In vitro nutrient digestibility and antioxidative properties of flour prepared from sorghum germinated at different conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 76, 3077-3089. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03804-8>
- Slima, S. B., Ktari, N., Trabelsi, I., Moussa, H., Makni, I., & Salah, R. B. (2018). Purification, characterization and antioxidant properties of a novel polysaccharide extracted from Sorghum bicolor (L.) seeds in sausage. *International journal of biological macromolecules*, 106, 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.010>
- Sorour, M., Mehanni, A., Taha, E., & Rashwan, A. (2017). Changes of total phenolics, tannins, phytate and antioxidant activity of two sorghum cultivars as affected by processing. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 87, 267-274 <http://dx.doi.org/10.21608/jfds.2017.38699>
- Sruthi, N. U., Rao, P. S., & Rao, B. D. (2021). Decortication induced changes in the physico-chemical, anti-nutrient, and functional properties of sorghum. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 104031. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104031>
- Stefoska-Needham, A., Beck, E. J., Johnson, S. K., & Tapsell, L. C. (2015). Sorghum: an underutilized cereal whole grain with the potential to assist in the prevention of chronic disease. *Food Reviews International*, 31, 401-437. <http://doi.org/10.1080/87559129.2015.1022832>
- Sullivan, A. C., Pangloli, P., & Dia, V. P. (2018). Kafirins from Sorghum bicolor inhibition of inflammation in THP-1 human macrophages is associated with reduction of intracellular reactive oxygen species. *Food and Chemical Toxicology*, 111, 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.002>
- Sun, H., Wang, H., Zhang, P., Ajlouni, S., & Fang, Z. (2020). Changes in phenolic content, antioxidant activity, and volatile compounds during processing of fermented sorghum grain tea. *Cereal Chemistry*, 97, 612-625. <http://doi.org/10.1002/CCHE.10277>
- Taylor, J., Bean, S. R., Ioerger, B. P., & Taylor, J. R. N. (2007). Preferential binding of sorghum tannins with  $\gamma$ -kafirin and the influence of tannin binding on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science*, 46, 22-31. <http://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.11.001>
- Taylor, J., Taylor, J. R. N., Belton, P. S., & Minnaar, A. (2009). Kafirins Microparticle Encapsulation of Catechin and Sorghum Condensed Tannins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 7523-7528. <http://doi.org/10.1021/jf901592q>
- Teferra, T. F. and J. M. Awika (2019). Sorghum as a healthy global food security crop: Opportunities and challenges. *Cereal Foods World*, 64, 1-8. <https://doi.org/10.1094/CFW-64-5-0054>

- Treviño-Salinas, M., Perales-Torres, A., Castillo-Ruíz, O., Montes-García, N., Lizarazo-Ortega, C., Navarro-Cortez, R., & Rodríguez-Castillejos, G. (2021). Proximal analysis and profile of fatty acids on six varieties of white grain sorghum with potential use in human consumption. *CyTA-Journal of Food*, 19, 547-551. <https://doi.org/10.1080/19476337.2021.1928757>
- Vanhercke, T., Belide, S., Taylor, M. C., El Tahchy, A., Okada, S., Rolland, V., ... & Petrie, J. R. (2019). Up-regulation of lipid biosynthesis increases the oil content in leaves of *Sorghum bicolor*. *Plant Biotechnology Journal*, 17, 220-232. <https://doi.org/10.1111/pbi.12959>
- Waniska, R. D. (2000). Structure, phenolic compounds, and antifungal proteins of sorghum caryopses. Paper presented at the Technical and institutional options for sorghum grain mold management: proceedings of an international consultation, 18, 19. <https://bit.ly/3LJqL7I>
- Wu, G., Ashton, J., Simic, A., Fang, Z., & Johnson, S. K. (2018). Mineral availability is modified by tannin and phytate content in sorghum flaked breakfast cereals. *Food Research International*, 103, 509-514. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.05>
- Xiong, Y., Zhang, P., Luo, J., Johnson, S., & Fang, Z. (2019). Effect of processing on the phenolic contents, antioxidant activity and volatile compounds of sorghum grain tea. *Journal of Cereal Science*, 85, 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.012>
- Xu, J., Wang, W., & Zhao, Y. (2021). Phenolic Compounds in Whole Grain Sorghum and Their Health Benefits. *Foods*, 10, 1921. <https://doi.org/10.3390/foods10081921>
- Yi, C., Li, Y., & Ping, J. (2017). Germination of sorghum grain results in significant changes in paste and texture properties. *Journal of texture studies*, 48, 386-391. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12241>
- Yu, M., Zhu, K., Wang, X., Lu, M., Zhang, L., Fu, X., & Yang, Q. (2020). Comparison of nutritional quality and sensory acceptability of biscuits obtained from wheat, native, or extruded sorghum flour. *Cereal Chemistry*, 97, 1244-1253. <https://doi.org/10.1002/CCHE.10349>

2022 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>