

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE VETERINARIA**

**EFFECTO DE LA RECONSTITUCIÓN DE GRANOS DE MAÍZ Y SORGO  
SOBRE LA DIGESTIBILIDAD DE LOS NUTRIENTES EN POLLOS DE  
ENGORDE**

por

**María José IRIGOYEN AGUERREGOYEN  
Cecilia Verónica RODRÍGUEZ MARTINS**

TESIS DE GRADO presentada como  
uno de los requisitos para obtener  
el título de Doctor en Ciencias  
Veterinarias Orientación: Higiene,  
Inspección-Control y Tecnología de los  
Alimentos de origen animal.

MODALIDAD Ensayo Experimental

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2024**

## PÁGINA DE APROBACIÓN

Tesis aprobada por:



Presidente de mesa:

Analía Pérez



Segundo miembro:

Marina Fernández

Tercer miembro:



Deborah Robert

Cuarto miembro:



Sebastián Brambillasca

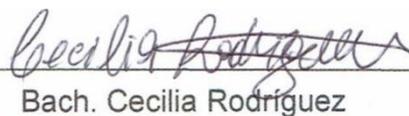
Fecha:

13/12/2024

Autores:



Bach. María José Irigoyen



Bach. Cecilia Rodríguez

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias, queremos agradecerles por su incondicional apoyo y comprensión durante este arduo camino.

A Lorenzo, que esperó pacientemente por horas para jugar, gracias por confiar.

A nuestros tutores, Marina y Sebastián, por su inestimable guía y acompañamiento durante todo el proceso.

A nuestros compañeros de tesis; Agustina, Matías, Federica y Mauricio, por los gratos momentos compartidos durante todo el trabajo práctico.

A todo el personal del Laboratorio de Nutrición de Facultad de Veterinaria, de la Udelar, por el entrenamiento y apoyo en el procesamiento de las muestras.

A todo el personal del campo experimental de Libertad, por su ayuda a la hora de realizar los trabajos prácticos.

A nuestra casa de estudio, Facultad de Veterinaria de Udelar

## TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN .....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
CUADROS.....	5
FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	6
SUMMARY .....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	10
Contexto internacional y nacional de la producción de proteína cárnica .....	10
El maíz como principal cereal utilizado en la alimentación avícola.....	11
El sorgo como alternativa al maíz.....	12
Características del sorgo .....	12
Limitaciones nutricionales del sorgo .....	14
Tratamientos utilizados en este trabajo para mejorar el aprovechamiento de granos de cereales:.....	16
HIPÓTESIS .....	18
OBJETIVOS .....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos.....	18
MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
Localización.....	18
Diseño experimental.....	18
Manejo y Alimentación .....	19
Toma de muestras.....	21
Análisis químicos.....	21
Análisis estadístico .....	22
RESULTADOS .....	23
DISCUSIÓN.....	25
CONCLUSIONES.....	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	28

## **CUADROS**

Cuadro 1.....	20
Cuadro 2.....	23
Cuadro 3.....	24

## **FIGURAS**

Figura 1. Pronóstico para el año 2025 de producción mundial de diferentes proteínas cárnicas .....	10
Figura 2. Esquema de la estructura del grano de sorgo .....	13
Figura 3. Ubicación de los factores antinutricionales del sorgo .....	14

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la reconstitución de granos secos de maíz y sorgo sobre su composición química y la digestibilidad de nutrientes en pollos de engorde. El ensayo se llevó a cabo en el Instituto de Producción Animal (IPAV) de la Facultad de Veterinaria en Libertad, San José, Uruguay. Se utilizaron 180 hembras de la línea genética Ross 308 (Ross Aviagen), adquiridas con un día de vida de una incubadora comercial. Las aves fueron alojadas en un galpón experimental. Durante los primeros 9 días, se les proporcionó una dieta comercial de iniciación y agua *ad libitum*. A partir del décimo día y hasta el decimonoveno, se les alimentó con una dieta basada en maíz seco molido y un núcleo proteico, vitamínico y mineral, con la adición de un 2% de ceniza insoluble en ácido como marcador indigestible. El día 20 las aves se pesaron en forma individual, se distribuyeron en bloques por peso vivo y se alojaron en jaulas en grupos de 5 animales (unidad experimental) con 6 repeticiones por tratamiento, siguiendo un diseño de bloques completos al azar. Se prepararon seis dietas en total utilizando una variedad de maíz y dos variedades de sorgo (S1 y S2), distribuidas aleatoriamente entre las unidades experimentales: tres con granos secos molidos (3 mm) y tres con los mismos granos secos molidos (3 mm) que fueron reconstituidos, llevándolos a un 35% de humedad con el agregado de agua y colocados herméticamente en contenedores plásticos de 50L para su fermentación anaerobia. Las dietas se formularon para incluir la misma proporción de granos secos o reconstituidos, con las siguientes proporciones: 59% del grano de estudio (maíz o sorgo, seco o reconstituido), 39% de núcleo proteico-vitamínico-mineral y 2% de ceniza insoluble en ácido. A partir del día 20 se comenzó con las dietas experimentales y después de 5 días de acostumbramiento, se comenzó a recolectar las excretas cada 12 horas durante 3 días. Estas excretas se secaron en una estufa a 60°C, se molieron y se conformó un pool por jaula para luego determinar la digestibilidad de nutrientes en el laboratorio, utilizando el marcador indigestible (ceniza insoluble en ácido). Este estudio reveló que la reconstitución de los granos secos provocó cambios en su composición química, aumentando el contenido de proteína bruta (PB) un 1,2% ( $P < 0,001$ ), mientras que no afectó el contenido de almidón de los granos ( $P = 0,582$ ). Por otro lado, se vio un efecto de la conservación, aumentando la digestibilidad de todos los nutrientes estudiados ( $P < 0,001$ ). En particular, la mejora fue más pronunciada en el sorgo S2 después del procesamiento, en comparación con los otros granos. El proceso de fermentación de los granos provocó que el grano de sorgo alcanzara niveles de aprovechamiento digestivo similares y hasta mejores que el maíz al ser incluidos en dietas para pollos de engorde.

## SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the effect of reconstitution of dry corn and sorghum grains on their chemical composition and nutrient digestibility in broiler chickens. The trial was conducted at the Animal Production Institute (IPAV) of the Veterinary Faculty in Libertad, San José, Uruguay. In total, 180 one-day-old Ross 308 female broilers were obtained from a commercial hatchery. The birds were housed in an experimental facility and provided a commercial starter diet and water *ad libitum* for the first 9 days. From days 10 to 19, birds were fed with a diet based on ground dry corn, combined with a protein-vitamin-mineral supplement, and 2% acid-insoluble ash as an indigestible marker. On day 20, birds were individually weighed and then distributed into blocks by live weight, housed in cages with groups of 5 birds per cage (experimental unit), with 6 replicates per treatment following a randomized complete block design. Diets were formulated using 1 variety of corn or 2 varieties of sorghum (S1 and S2), which were ground (3mm) and stored dry or reconstituted. Grain reconstitution was conducted using dry ground grains, with the addition of water to reach 35% moisture, then and stored in 50-L plastic containers for anaerobic fermentation. The diets were formulated to include the same proportion of dry or reconstituted grains, randomly assigned to the experimental units, with the following proportions: 59% of the study grain (corn or sorghum, dry or reconstituted), 39% of protein-vitamin-mineral core, and 2% of acid-insoluble ash. Experimental diets and excreta were collected and analyzed for nutrient digestibility determination. This study revealed that the reconstitution of dried grains caused changes in their chemical composition, increasing the crude protein (CP) content by 1.2% ( $P < 0,001$ ), while it did not affect the starch content of the grains ( $P = 0,582$ ). On the other hand, an effect of conservation was seen, increasing the digestibility of all the nutrients studied ( $P < 0,001$ ). In particular, the improvement was more pronounced in S2 sorghum after processing, compared to the other grains. The fermentation process of the grains caused the sorghum grain to reach similar and even better digestive utilization levels than corn when included in diets for broiler chickens.

## INTRODUCCIÓN

En Uruguay la carne aviar es la segunda proteína más consumida después de la bovina, con 24 kg per cápita por año, siendo la única con un aumento sostenido en el consumo durante los últimos 5 años (Instituto Nacional de Carnes (INAC), 2023). Según la Cámara Uruguaya de Procesadores Avícolas (CUPRA, en prensa), se estima un aumento del 2% anual, llegando a 2030 con un consumo de 28 kg/per cápita por año.

Para alcanzar estos objetivos, la alimentación tiene un rol preponderante. Los alimentos balanceados son la fuente principal de nutrientes en la avicultura industrial. Estos utilizan como principal fuente de energía el almidón de los cereales (Stevnebø, Sahlström y Svihus, 2006). En nuestro país el cereal de elección utilizado en la elaboración de raciones balanceadas para pollos de engorde es el maíz, sin embargo, su producción se vio afectada por el déficit hídrico observado en algunas zafas, reduciendo su rendimiento por hectárea (Pizzanelli, 2023). Por esta razón se vuelve interesante estudiar otras opciones para sustituirlo parcial o totalmente por otro cereal.

Una alternativa disponible en nuestro mercado es el grano de sorgo. Este es el quinto cereal cultivado en el mundo luego del maíz, el arroz, el trigo y la cebada (Food and Agriculture Organization of the United Nation Statistic, (FAOSTAT), 2024). Una característica del grano de sorgo es que se encuentra adaptado para soportar temperaturas medias más altas que otros cultivos de cereales (Mundia, Secchi, Akamani y Wang, 2019). Según Farré y Faci (2006), en un estudio realizado en el noreste de España, en condiciones de déficit hídrico, el sorgo se adaptó mejor, aprovechando más eficientemente el agua del suelo, adaptando su fenología y logrando menores reducciones en el rendimiento en comparación con el maíz. Según Pizzanelli (2023), en la zafra 2022-2023 la caída del rendimiento por hectárea bajo condiciones de déficit hídrico fue menor en el sorgo en comparación con el maíz. En Uruguay la casi totalidad de la demanda de estos granos (maíz y sorgo) tiene como destino la alimentación animal y solamente un 8 % se destina a la producción de etanol (Methol, 2021).

Si bien estas condiciones resultan atractivas para su utilización, se debe tener en cuenta la dificultad en el aprovechamiento de los nutrientes del grano de sorgo por parte de los monogástricos (Liu, Selle y Cowieson, 2013). Las principales limitaciones al valor nutricional del sorgo son las kafirinas, que son la fracción proteica dominante, los compuestos fenólicos, entre ellos los taninos condensados y los fitatos (Liu et al., 2015). Las kafirinas se encuentran en estrecha proximidad física con la glutelina y los gránulos de almidón, formando una red con enlaces cruzados de disulfuro que impiden la utilización del almidón (Liu et al., 2015). Por su parte Truong et al., (2017) indicaron que el rendimiento y los indicadores de eficiencia de utilización de la energía en pollos de engorde fueron influenciados negativamente según la concentración de compuestos fenólicos en distintas variedades de sorgo. Según informó Zhu (2015) estos compuestos son capaces de formar complejos con el almidón, preferentemente con la amilosa, afectando sus propiedades nutricionales. En la misma línea, los taninos condensados a través de interacciones hidrofóbicas con el almidón disminuyen también su digestibilidad (Barros, Awika y Rooney, 2012). Además, los taninos pueden formar complejos con proteínas, por lo que se deduce que el tanino puede unirse a enzimas endógenas en el tracto gastrointestinal, inhibiendo así su

actividad e impidiendo la digestión (Selle, Cadogan, Li y Bryden, 2010). Según la presencia y concentración de taninos, el sorgo varía su composición y valor nutricional (Lopes et al., 2017). En cuanto a los fitatos, estos pueden disminuir la digestión del almidón a través de la formación de complejos con proteínas mediante enlaces fosfatos (Liu et al., 2015), e inhiben la actividad de algunas enzimas digestivas (amilasa, sacarasa y Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATPasa) (Liu, Ru, Li y Cowieson, 2008) comprometiendo la absorción intestinal de nutrientes.

Con el fin de mejorar el aprovechamiento de los nutrientes del sorgo, se pueden utilizar distintas tecnologías de procesado, entre las que se encuentran molienda, donde se reduce el tamaño de la partícula, y el granulado al vapor, los copos al vapor y la extrusión. En estos últimos se busca la gelatinización del almidón para aumentar su digestibilidad a través de diferentes procesos que requieren humedad y temperatura. Otros métodos descritos son el ensilaje de grano húmedo (Lopes et al., 2017) y la reconstitución (Aguerre, Cajarville y Repetto, 2015) que no requieren de mayores equipamientos. El ensilaje de grano húmedo se realiza con granos inmaduros cosechados con alto contenido de humedad (Lopes et al., 2017), en tanto la reconstitución se realiza con grano seco maduro al que se le agrega agua y se almacena en condiciones de anaerobiosis para que se produzca su fermentación (Brambillasca, Fernández-García, Aguerre, Repetto y Cajarville, 2019). Estudios anteriores han demostrado que la reconstitución reduce el contenido de taninos en sorgo con altos niveles de taninos (Mitaru, Reichert y Blair, 1983). Los ácidos orgánicos generados en condiciones anaeróbicas producen la ruptura de la matriz proteica que envuelve a los gránulos de almidón exponiéndolos a la acción de las enzimas (Rooney y Pflugfelder, 1986). El proceso de ensilaje además disminuye los niveles de taninos totales y condensados en el sorgo, mejorando el índice de conversión del alimento (Lopes et al., 2017). Según Kumar et al., (2007), la reconstitución de sorgo rojo con alto contenido de taninos redujo en un 30% aproximadamente su concentración. En el mismo sentido Manwar y Mandal (2008), encontraron en un estudio realizado *in vivo* con pollos de 8 semanas de edad alimentados con cereales reconstituidos, entre ellos sorgo, con y sin enzimas, que la reconstitución sin enzimas mejoró significativamente la digestibilidad de las proteínas y carbohidratos. Además, se observó una reducción en los factores antinutricionales (FAN), como los taninos y los fitatos, lo que resultó en una mejor absorción de nutrientes.

Si bien el ensilaje de grano húmedo implica reducir un paso para la fermentación, con respecto a la reconstitución del grano seco al cual hay que agregar agua, la logística que supone cosechar con el contenido adecuado de humedad, presenta cierta dificultad ya que cualquier inconveniente alteraría la ventana óptima para su embolsado. El grano de sorgo puede perder de 1 a 3% de humedad por día según la zona en la que se encuentre y las condiciones climáticas (Rovira y Velazco, 2012). La reconstitución brinda la posibilidad de realizarse todo el año ya que se utiliza el grano seco de sorgo que es como mayormente se comercializa, contrariamente al ensilaje de grano húmedo que es estacional.

Por todo lo expuesto anteriormente, pensamos que la reconstitución del grano de sorgo modificará su composición química, aumentando la disponibilidad de nutrientes, mejorando de esta forma la digestibilidad, siendo factible su inclusión en las raciones balanceadas como otra opción de cereal diferente del maíz.

Con este trabajo pretendemos generar información sobre el efecto de la reconstitución de granos secos de sorgo y de granos secos de maíz, en su composición química. Además, estudiaremos la digestibilidad *in vivo* de los granos cuando son incluidos en dietas completas para pollos de engorde

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### Contexto internacional y nacional de la producción de proteína cárnica

La producción mundial de las tres principales fuentes de proteína cárnica en 2025 se estima será de 281 millones de toneladas. Como se muestra en la Figura 1, se encuentra liderada por la carne de cerdo con 115 millones de toneladas, seguida por la carne de ave con 105 millones de toneladas y en tercer lugar la carne vacuna con 61 millones de toneladas (United States Department of Agriculture, (USDA), 2024). Se espera que la demanda mundial promedio per cápita de carne aumente 2%, desde el periodo base 2020-2022 hasta el 2032, siendo este crecimiento cubierto principalmente por la carne de ave y un aumento significativo en la producción de carne de cerdo (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2023). La demanda de carne de ave se mantendrá elevada, debido a su bajo precio frente al de otros alimentos, incluso con su aumento sostenido desde el año 2020, según análisis de información de la Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO) (2023), la carne aviar fue la de mayor crecimiento en 2021 y 2022, sin embargo, en 2023 el precio internacional cayó 6%.

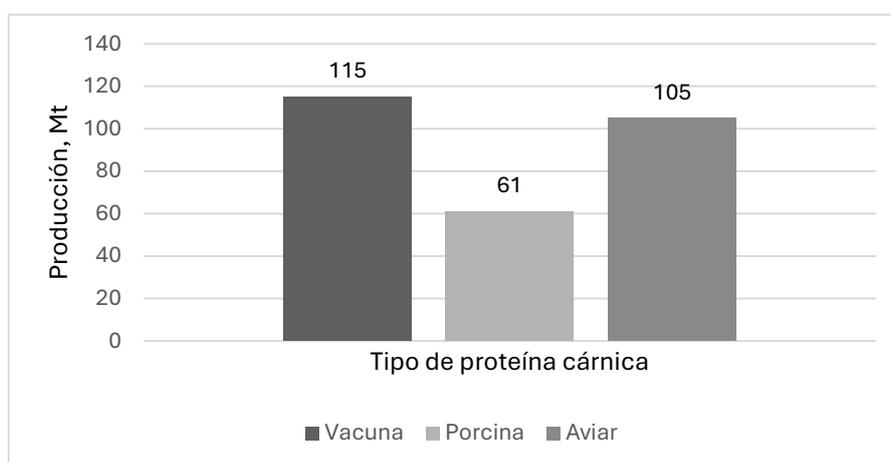


Figura 1. Pronóstico para el año 2025 de producción mundial de diferentes proteínas cárnicas (Mt). (Elaborado con datos de Livestock, USDA, 2024)

Los principales productores de carne de ave a nivel mundial son Estados Unidos con 21,7 millones de toneladas, seguido por China con 15,3 y Brasil con 15,1 (USDA, 2024). En Uruguay en el año 2023 se produjeron 77 mil toneladas de carne de ave (INAC, 2024), siendo la segunda proteína más consumida después de la bovina, con 24 kg per cápita por año, y la única con un aumento sostenido en el

consumo desde el 2018 al 2022 y un pequeño descenso en el 2023 (INAC, 2023). La cadena avícola de carne en Uruguay genera más de 4000 empleos directos en todas sus etapas de producción (CUPRA, 2023). En lo que va del año 2024, tres empresas concentran más del 70% de la faena (INAC, 2024) y gestionan una cadena productiva integral que abarca desde incubaduría, cría de reproductoras, engorde, elaboración del alimento, faena y hasta la comercialización de la carne. Según Gorga (2023), en el anuario OPYPA 2023 que analiza desde enero a octubre del mismo año, el mercado interno se abasteció no solo con el 98,5% de lo producido (1,5 % restante se exportó, incluyendo las garras) sino que además se importaron productos congelados (pollo entero, cortes con hueso y sin hueso) de EEUU, Brasil, y Argentina representando un 4,8% de lo comercializado en plaza. El precio doméstico se determina en forma interna por la baja participación de las importaciones, lo que genera una disparidad con el precio de importación (Durán, Hernández, Aguirre y Gorga, 2020). Estas industrias avícolas mucho más grandes como EEUU, Brasil y Argentina pueden producir carne de ave a menores costos debido a sus economías de escala, que permite ofrecer precios más bajos que la carne producida localmente en Uruguay.

## **El maíz como principal cereal utilizado en la alimentación avícola**

En la elaboración de raciones balanceadas se utiliza como principal fuente de energía el almidón de los cereales (Stevnebø et al., 2006). En Uruguay para la industria de carne aviar, se producen 150.000 toneladas por año de ración balanceada en base a maíz y soja (CUPRA, 2023).

Según los últimos informes de la base de datos de FAOSTAT, en 2021 el maíz fue el primer cultivo del mundo en producción y en rendimiento por hectárea. La producción de este cereal ha crecido sostenidamente en la región (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay), siendo Brasil el segundo productor mundial de maíz y Argentina el tercero. En la zafra 2021/2022 la región produjo 177 millones toneladas, cifra récord que representó el 15% de la producción mundial de maíz (Pizzanelli, 2023).

En Uruguay la superficie sembrada de maíz crece sostenidamente desde la zafra 2017/18 alcanzando en la zafra 2022/23 las 187.919 hectáreas siendo el mayor registro en los últimos 45 años. El rendimiento por hectárea promedio de la última zafra alcanzó los 1415 kg/ha, mucho más bajo de lo que se esperaba, a consecuencia del déficit hídrico, y por este motivo se observa una tendencia creciente a implementar sistemas de riego (Pizzanelli, 2023).

Existe una percepción en la industria de los alimentos balanceados de que el maíz tiene un valor nutricional alto, haciéndolo atractivo para el uso en dietas de aves (Cowieson, 2004). Sin embargo, hay cierta variabilidad en su composición en cuanto al contenido de almidón, proteína y grasa de una zafra a la otra (United States Grain Council (U.S. GRAIN COUNCIL), 2021). El objetivo de la inclusión del maíz en las dietas de las aves de corral es aportar energía, pero también aporta aproximadamente el 20% de la proteína en dietas de iniciación en pollos de engorde (Cowieson, 2004). A pesar de esto, se considera que la proteína del maíz es de bajo valor nutricional ya

que su perfil de aminoácidos no se ajusta a los requerimientos de las aves (Peter, Han, Boling, Parsons y Baker, 2000).

### **El sorgo como alternativa al maíz.**

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cereales más importantes y también el principal alimento básico de millones de personas en los trópicos semiáridos, y se cultiva ampliamente en África, China, Estados Unidos, México e India (Khaton et al., 2016). Es el quinto cereal cultivado en el mundo luego del maíz, el arroz, el trigo y la cebada (FAOSTAT, 2021). En 2021 se estima, según FAOSTAT, que la producción se distribuyó entre África con un 41%, las Américas con un 32%, Asia 21%, Oceanía 3% y en Europa 2%, demostrando ser un cereal importante en el mundo, tanto para alimentación animal como humana. En Uruguay, durante la zafra 2022-2023, se calculó que la superficie cultivada de sorgo fue de 45.781 hectáreas, en contraste con las 56.824 hectáreas del período 2021-2022. Esta reducción en el área sembrada ha ocasionado, como era de esperarse, una disminución en la producción de este grano, agravada además por la crisis hídrica que afectó especialmente a la última zafra, lo que intensificó aún más la caída en la producción. El sorgo se utiliza tanto para la obtención de grano húmedo, con el propósito de almacenarlo como ensilaje en bolsones, como aquellas orientadas a la cosecha del grano en su forma seca (Pizzanelli, 2023), ambas para alimentación animal.

El sorgo es un cultivo rústico adaptado a diferentes tipos de suelo, con bajo requerimiento de humedad y un uso del agua más eficiente que el maíz, debido a sus abundantes y particulares raíces fibrosas (Irigoyen y Perrachon, 2007). El sorgo es el más tolerante a la sequía entre los cinco principales cereales cultivados en el mundo, lo que lo hace una alternativa en zonas que reciben poca lluvia (Hossain, Islam, Rahman, Mostofa y Khana, 2022). Según Farré y Faci (2006) en condiciones de déficit hídrico el rendimiento del sorgo es superior al del maíz. En la misma línea, el sorgo presenta cualidades varias que ayudan al uso eficiente del agua como tener sus hojas revestidas por una capa cerosa blanquecina que reduce las pérdidas por evaporación, tener la facultad de plegar las hojas en caso de sequía a través de células especializadas y poseer numerosos estomas pequeños que permite un control muy eficiente de los cambios gaseosos (Irigoyen y Perrachon, 2007). Sumado a lo anterior, la capacidad del sorgo para extraer agua de capas profundas del suelo es mayor que la del maíz (Farre y Faci, 2006). En un contexto mundial de creciente demanda de agua dulce y patrones climáticos cambiantes, el sorgo puede desempeñar un papel fundamental en la alimentación (Hossain et al., 2022).

### **Características del sorgo**

Así como el maíz, el sorgo y el mijo son plantas C4 de tipo tropical, y como tales, son más eficientes en la utilización de la energía solar en las latitudes tropicales en comparación con el trigo y el arroz, que son de tipo templado C3 (Sage y Zhu, 2011). El sorgo pertenece a la familia Poaceae (gramíneas) y es originario de África, sin embargo, su producción se ha extendido a nivel mundial. En una clasificación simple de los sorgos cultivados se pueden separar en 5 especies; bicolor, kafir,

caudatum, durra y guinea (de Wet, 1978). Es una especie estival, de ciclo corto y con pocos requerimientos de agua (Mundia et al., 2019).

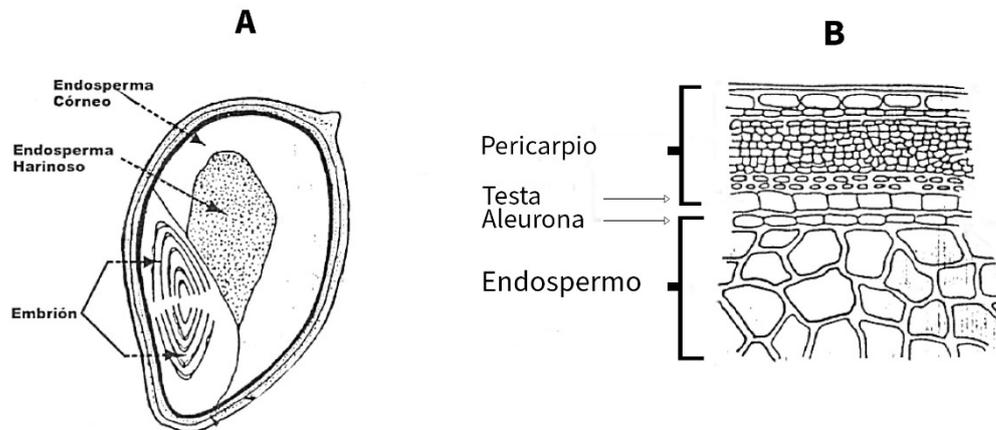


Figura 2. (A) Esquema de la estructura del grano de sorgo sección longitudinal (Adaptado de Frederiksen, 1985) (B) Esquema de la estructura del grano de sorgo sección transversal (Adaptado de Rooney, 1971 como se cita en Domanski et al., 1997).

Como se muestra en la Figura 2 el grano se compone de un 6,5% de pericarpio (capa externa), 9,4% de germen (embrión y tejido de reserva) y un 84,2% de endospermo, que es el segundo tejido de almacenamiento (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). Esta composición puede variar dependiendo del ambiente en donde se desarrolle y el genotipo del grano (Taleon, Dykes, Rooney y Rooney, 2012). El pericarpio puede presentar diferentes colores que son controlados genéticamente y pueden, según se combinen los genes R e Y, dar coloraciones blancas, amarillas o rojas (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). Algunos genotipos tienen debajo de la capa externa o pericarpio, una capa llamada testa controlada por los genes B1 y B2, que puede contener compuestos fenólicos como son los taninos condensados, que afecta el valor nutricional y la palatabilidad del grano, pero le brindan al cultivo mayor resistencia al ataque de las aves (Blakely, Rooney, Sullins y Miller, 1979). Físicamente la testa separa a las partes internas del medio ambiente, químicamente, además, impide la entrada de microorganismos (Earp, McDonough, Awika y Rooney, 2004). Además de los taninos mencionados, el sorgo tiene una amplia gama de compuestos fenólicos concentrados en el pericarpio que incluyen ácidos fenólicos y flavonoides (Dykes, Peterson, Rooney y Rooney, 2011).

La composición química del sorgo varía según su genética y el entorno de cultivo, pero en términos generales, el sorgo contiene aproximadamente un 12,3% de proteínas, un 3,6% de grasas y un 9,3% de fibra dietética (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). El almidón es el carbohidrato más abundante del sorgo y también el componente más abundante del grano, representando alrededor del 73,8% de su composición total (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). Este se sintetiza en forma de gránulos esféricos rugosos, que se encuentran en el endospermo y está formado en su mayoría por amilopectina, un tipo de polímero que representa el 75 % y por amilosa, que ocupa el 25 % restante (Liu et al., 2015). El endospermo se compone de dos capas: una capa periférica, conocida como endospermo córneo, que contiene gránulos inmersos en una matriz proteica, y una capa central, llamada

endospermo harinoso, que tiene una mayor concentración de gránulos de almidón sin estar incrustados en dicha matriz proteica (Huntington, 1997).

### Limitaciones nutricionales del sorgo.

Existen tres factores principales en el sorgo que interfieren en la correcta utilización del almidón por parte de los animales como fuente de energía, estos son las kafirinas, los fitatos y los compuestos fenólicos (Liu et al., 2015), cuya ubicación en el grano se muestra en la Figura 3.

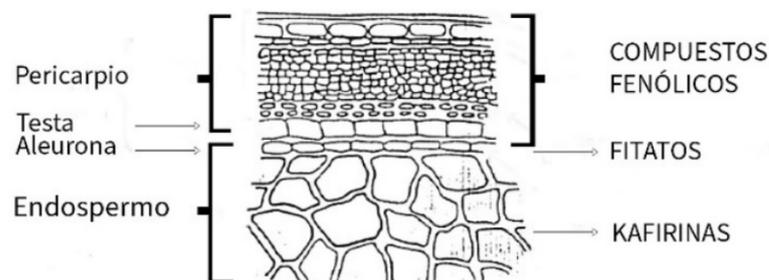


Figura 3. Ubicación de los factores antinutricionales del sorgo  
(Adaptado de Rooney, 1971 como se cita en Domanski et al., 1997)

La proteína predominante en el grano de sorgo es la Kafirina. Esta se encuentra en el endospermo, en estrecha proximidad física con la glutelina y los gránulos de almidón, formando una red con enlaces cruzados de disulfuro que impiden su utilización (Liu et al., 2015), uniéndose además a los taninos condensados (Taylor et al., 2007). Se divide en 3 fracciones alfa, beta y gama kafirinas con 67,3% para la alfa, 22,7 % la beta y la gama con 10% (Oria, Hamaker y Schull, 1995). Según Selle et al., (2020), estas proporciones varían acorde al genotipo del grano. La alfa kafirina estructuralmente se localiza en el núcleo central mientras que beta y gama kafirina se localizan periféricamente (Selle, 2011). Las gamma y beta kafirinas tienen un elevado contenido de cisteína responsable en la formación de enlaces disulfuro, que le confieren la estructura reticulada a esta prolamina (Belton, Delgadillo, Halford y Shewry, 2006). Esta proteína es de baja calidad nutricional, según un estudio realizado por Selle et al., (2020) en donde determinaron que las concentraciones de aminoácidos limitantes para pollos de engorde como son la metionina, lisina y la treonina fueron bajas para los requerimientos. Como demostraron Truong et al., (2017), existe una relación negativa entre la cantidad de kafirinas presentes en 6 genotipos de sorgo, la digestibilidad ileal del almidón y el aprovechamiento energético del grano. En el mismo sentido, Taylor et al., (2007) concluyeron que la gama kafirina tiene mayor afinidad por los taninos condensados que la alfa y beta kafirina, probablemente debido a su alto contenido de prolina, ya que esta forma más enlaces de hidrógeno e interacciones hidrófobas entre taninos y cadenas peptídicas.

El fitato es la sal mixta del ácido fítico, se encuentra presente en los alimentos de origen vegetal y dentro del sorgo el mayor reservorio se encuentra en la aleurona

(Doherty, Faubion y Rooney, 1982). En las semillas, el fósforo se almacena principalmente en forma de fitatos (Humer, Schwarz y Schedle, 2015), que tienen la capacidad de quelar cationes como el calcio, hierro y zinc, y comprometer la utilización de otros nutrientes como proteínas, lípidos y almidón (Humer et al., 2015). Los fitatos también afectan la actividad de algunas enzimas que ayudan a la digestión como la amilasa, la sacarasa y la Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPasa (Liu et al., 2008), además de las enzimas necesarias para la degradación de proteínas en el intestino delgado y estómago (Kies, De Jonge, Kemme y Jongbloed, 2006), llevando a que la absorción de nutrientes sea menos eficiente. Según Liu et al., (2008) el fitato es capaz de alterar la fisiología secretora y absorptiva en pollos de engorde. Esta disminución en la utilización de nutrientes implica mayores niveles de suplementación y mayor desperdicio de nutrientes con los perjuicios ambientales que conlleva (Humer et al., 2015). El tiempo de tránsito y el pH del tracto digestivo de las aves de corral no permiten la desfosforilación del fitato (Selle y Ravindran, 2007), esto limita la biodisponibilidad de fósforo para los animales monogástricos (Humer et al., 2015), por ello es necesaria la adición de una enzima exógena como lo es la fitasa en el alimento (Selle y Ravindran, 2007). La inclusión de esta enzima mostró una mejoría de la actividad de las enzimas endógenas, por lo tanto, la fitasa puede compensar la digestión y la recuperación de nutrientes (Liu et al., 2008).

El sorgo contiene compuestos fenólicos, que se pueden dividir en tres grupos, los taninos, los ácidos fenólicos y los flavonoides (Tapiwa, 2019). Los compuestos fenólicos se concentran en las capas externas del sorgo, principalmente en el pericarpio y la testa (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019), protegiendo al grano contra insectos, pájaros, hongos y el ambiente (Waniska, Poe y Bandyopadhyay, 1989).

Existen dos subgrupos de taninos, los hidrolizables y los condensados (Tapiwa, 2019), y la casi totalidad de los taninos del sorgo son del tipo condensados (Awika y Rooney, 2004). Solo los genotipos con testa pigmentada producen taninos condensados o proantocianidinas (Waniska, 2000). Los sorgos se clasifican en tipo I (sin taninos), tipo II (taninos presentes en testa pigmentada) y tipo III (taninos presentes en testa pigmentada y pericarpio) (Waniska, 2000). Dentro de los cereales, el sorgo es el que contiene mayores cantidades de taninos (Gualtieri y Rapaccini, 1990). Los efectos de los taninos han sido ampliamente estudiados, en este sentido, en un estudio realizado *in vivo* por Nyamambi, Ndlovu, Read y Reed, (2000) en pollos de engorde, demostró que las aves alimentadas con una dieta con alto contenido de taninos redujeron la ganancia de peso y el consumo de alimento en comparación con las que recibieron dietas basadas en maíz, además de encontrar que la actividad de la amilasa y la tripsina en el tracto digestivo también fue menor, concluyendo que existen interacciones tanino-enzima y tanino-proteínas dietéticas que afectan el rendimiento de las aves. Los taninos actúan como inhibidores de la actividad enzimática de la amilasa, lo que resulta en una disminución de la disponibilidad del contenido energético del sorgo y pueden reducir eficazmente la digestión del almidón (Tapiwa, 2019). En el mismo sentido, los taninos, además de otros compuestos fenólicos, inhiben la bomba Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPasa de membranas de células intestinales comprometiendo la absorción de nutrientes (Welsch, Lachance y Wasserman, 1989).

Los ácidos fenólicos del sorgo se dividen en dos clases: los ácidos hidroxibenzoico e hidroxicinámico, estos se encuentran de forma libre en las capas

externas del grano (pericarpio, testa y aleurona) y combinados en asociación con las paredes celulares, siendo estos últimos los de mayor proporción en el sorgo (Dykes y Rooney, 2006).

En cuanto a los flavonoides, en el sorgo han sido aislados e identificados varios, los principales en ser estudiados fueron las antocianinas y entre ellas se destacan la cianidina, delphinidina, malvidina, pelargonidina, petunidina y peonidina, que le dan la coloración a los granos (Dykes y Rooney, 2006). En un estudio *in vivo* en pollos de engorde alimentados con dietas nutricionalmente equivalentes que contenían sorgos libres de taninos y cuantificados para compuestos fenólicos se demostró que estos tuvieron un efecto negativo en la utilización de nutrientes de la dieta (Truong et al., 2017).

### **Tratamientos utilizados en este trabajo para mejorar el aprovechamiento de granos de cereales:**

Debido al bajo aprovechamiento digestivo del sorgo es común el uso de diferentes tratamientos para mejorarlo, entre ellos la molienda, la reconstitución y el ensilaje. La molienda es la reducción del tamaño de las partículas de los granos. Esta se realiza mediante molinos de martillo o de rodillo, y es la primera etapa para la preparación de dietas para aves y cerdos (Liu et al., 2013). Los granos de cereales se muelen para exponer los nutrientes presentes en el endospermo y el germen, aumentando así el área de contacto para las enzimas digestivas (Dunmire, Stark y Paulk, 2021). Un estudio *in vitro* realizado por Mahasukhonthachat, Sopade y Gidley, (2010) concluyó que la reducción del tamaño de partícula aumentó la tasa de digestión del almidón, el índice de solubilidad/absorción de agua y modificó las propiedades de empastado del almidón.

El ensilaje conserva el cereal en un ambiente de alta humedad, anaerobiosis y pH reducido (Golcher, Lima, Fialho, Rodrigues y de Lima, 2010), siendo el correcto prensado fundamental al igual que la estimulación del crecimiento de bacterias ácido-lácticas para evitar la actividad de microorganismos indeseables en el silo (Mc Donald et al., 2010). Los valores más bajos de pH alcanzados durante la fermentación pueden potenciar la absorción de ciertos nutrientes y reducir los FAN que interfieren con su biodisponibilidad y bioaccesibilidad (Adebo et al., 2022). Esta técnica es una alternativa económica y viable para reducir considerablemente los taninos (Lopes et al., 2017; Kumar et al., 2007), los fitatos (Gibson, Bailey, Gibbs, y Ferguson, 2010) y las kafirinas (Giuberti et al., 2014). La reducción del pH genera un ambiente óptimo para que las fitasas endógenas reduzcan el contenido de ácido fítico, liberando hierro, zinc y calcio solubles, que mejoran el nivel nutricional de los cereales alimentarios (Gibson et al., 2010). Según Manwar y Mandal, (2008) los contenidos de fitato disminuyeron significativamente debido a la reconstitución con o sin enzimas entre un 48% y un 60% para todos los cereales que utilizó, mejorando la digestibilidad de la proteína y otros nutrientes. Además, cuando se ensila el grano de sorgo se produce una alteración en la organización de la matriz proteica del endospermo, rompiendo la estructura que presenta el grano seco, liberando así los gránulos de almidón (Liu et al. 2015; Lopes, Berto, Costa, Baldassa y de Magalhaes, 2001), haciéndolos más accesibles para la  $\alpha$ -amilasa en el intestino delgado como demostraron Sholly, Jørgensen, Sutton, Richert y Bach Knudsen, (2011), en un estudio *in vivo* en cerdos al medir la digestibilidad ileal del almidón.

Otros autores han informado, que la fermentación de cereales por bacterias del ácido láctico aumenta los aminoácidos libres y sus derivados mediante proteólisis (Samtiya, Aluko y Dhewa, 2020). En el mismo sentido, se ha demostrado que la fermentación mejora el valor nutricional de los cereales al aumentar el contenido de aminoácidos esenciales como lisina, metionina y triptófano (Mohapatra, Patel, Kar, Deshpande y Tripathi, 2019).

A diferencia del ensilaje de grano húmedo, la reconstitución es el agregado de agua al grano seco y luego almacenarlo en condiciones anaeróbicas (Balogun, Rowe y Bird, 2005). Según Brambillasca et al., (2018), no se observaron diferencias significativas en la digestibilidad *in vitro* de los nutrientes entre dietas que contenían sorgo reconstituido o sorgo húmedo ensilado, cuando fueron utilizados en dietas para cerdos. En el mismo sentido, la reconstitución mejoró el valor nutricional en sorgos con alto contenido de taninos cuando fue utilizado en alimentación de pollos de engorde, incluso con tan solo 10 días de almacenamiento, siendo práctica su utilización en condiciones agrícolas (Mitaru, et al., 1983).

## **HIPÓTESIS**

La reconstitución de granos secos de sorgo y maíz provoca cambios en su composición química. Esto podría incrementar la digestibilidad de los nutrientes en comparación con el mismo grano seco no tratado. Además, el proceso de fermentación de los granos provoca que el grano de sorgo alcance niveles de aprovechamiento digestivo similares al maíz al ser incluidos en dietas para pollos de engorde.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de la reconstitución en granos secos de sorgo y maíz, sobre su composición química y la digestibilidad de nutrientes en pollos de engorde.

### **Objetivos específicos**

Identificar cambios en la composición química de los granos de maíz y sorgo vinculados al proceso de reconstitución.

Analizar si el proceso de reconstitución afecta la digestibilidad de los nutrientes en dietas que incluyen esos granos

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización**

El ensayo experimental se llevó a cabo en el Instituto de Producción Animal de la Facultad de Veterinaria (**IPAV**), Universidad de la República, Libertad, San José, Uruguay. Los análisis de composición química de los alimentos se realizaron en el laboratorio de la Unidad Académica de Nutrición Animal de la Facultad de Veterinaria de la Udelar.

### **Animales**

Se utilizaron 180 hembras de la línea genética Ross 308 (Ross Aviagen) adquiridas con un día de vida, provenientes de la incubaduría de una empresa comercial y vacunadas con Bronquitis infecciosa aviar y Coccidiosis aviar. El ensayo se realizó siguiendo el protocolo experimental aprobado por la Comisión de Ética en el Uso de Animales (CEUA) de la Facultad de Veterinaria, de acuerdo con los reglamentos sobre el uso de animales en experimentación, enseñanza e investigación de la Comisión Honoraria de Experimentación Animal de la Udelar (protocolo CEUA, Facultad de Veterinaria, CEUAFVET-1741).

### **Diseño experimental**

Se realizó un diseño experimental en bloques completamente al azar. El día 20 las aves se bloquearon por peso vivo y se alojaron en jaulas en grupos de 5

animales (unidad experimental) con un peso promedio por unidad de 3,62 kg  $\pm$  0,061 y 6 repeticiones por cada tratamiento. Se utilizaron jaulas metabólicas de 50 cm por 40 cm por 30 cm de tejido de alambre galvanizado, equipadas con comedero manual, bebedero automático de tipo niple y bandeja debajo de cada jaula para recolectar las excretas. Las dietas para cada unidad experimental fueron asignadas aleatoriamente.

Los tratamientos estudiados fueron:

- 1) Dieta con grano de maíz seco molido (**GMS**)
- 2) Dieta con grano de maíz molido y reconstituido (**GMR**)
- 3) Dieta con sorgo 1 (S1) seco molido (**SS1**)
- 4) Dieta con sorgo 2 (S2) seco molido (**SS2**)
- 5) Dieta con S1 molido reconstituido (**SR1**)
- 6) Dieta con S2 molido reconstituido (**SR2**)

## **Manejo y Alimentación**

Las aves fueron alojadas en un galpón experimental. El programa de iluminación fue de 24 hs de luz el día 1, descendiendo en forma gradual hasta lograr ciclos de 18 horas de luz y 6 horas de oscuridad al día 18.

Se alimentaron los primeros 9 días con una dieta comercial de iniciación y agua ad libitum. Posteriormente a partir del décimo y hasta el decimonoveno día se alimentaron con una dieta a base de maíz seco molido y núcleo proteico, vitamínico y mineral, más la adición (2% de la dieta) de un marcador indigestible (ceniza insoluble en ácido).

Las dietas fueron formuladas para contener el mismo nivel de inclusión de granos secos o reconstituidos de una variedad de maíz y de dos variedades de sorgo (Sorgo 1 y Sorgo 2). Estas se formularon según las recomendaciones de FEDNA 2018 en % de materia seca de la siguiente manera:

- 59%:** Grano de estudio (maíz/sorgo, seco/reconstituido)
- 39%:** núcleo proteico-vitamínico-mineral
- 2%:** Marcador indigestible (Ceniza insoluble en ácido)

**Cuadro 1.** Ingredientes y composición química de las dietas experimentales conteniendo grano de maíz seco (GMS), grano de maíz reconstituido (GMR), grano seco de sorgo 1 (SS1), grano reconstituido de sorgo 1 (SR1), grano seco de sorgo 2 (SS2) y grano reconstituido de sorgo 2 (SR2).

	GMS	GMR	SS1	SR1	SS2	SR2
<i>Ingredientes (g/100g MS)</i>						
Grano Seco	59,6	-	59,6	-	59,6	-
Grano Reconstituido	-	59,6	-	59,6	-	59,6
Harina de soja	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
Harina de pescado	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Aceite de Soja	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87	3,87
Carbonato de calcio	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61
DL-Metionina	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367
Sal	0,308	0,308	0,308	0,308	0,308	0,308
L-Lisina	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294
Mix vitamínico-mineral <sup>a</sup>	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240
Ads. micotoxinas <sup>b</sup>	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
L-Treonina	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190
L-triptófano	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Marcador indigestible <sup>c</sup>	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
<i>Composición química analizada (g/100g MS)</i>						
Materia seca	89,1	74,9	89,1	73,7	88,5	74,1
Materia orgánica	90,6	93,2	92,7	93,6	92,9	93,0
Almidón	44,7	38,5	42,8	36,3	42,1	38,0
Proteína bruta	20,6	21,7	19,6	21,0	19,8	20,6
Extracto etéreo	8,42	7,56	7,55	8,37	7,93	9,01
aFND <sup>d</sup>	9,27	12,3	11,5	14,6	12,7	14,0
FAD <sup>e</sup>	3,90	3,21	6,99	6,65	7,53	6,95
Fibra bruta	2,38	2,09	2,42	2,76	2,82	1,90

<sup>a</sup>Se suministra por kg de pienso: Vit. A, 25.000 IU; Vit. E, 62.1225 IU; Vit D3, 8750 IU; Vit. K, 6,25 mg; Tiamina (Vit. B1), 6,25 mg; Riboflavina (Vit. B2), 15,625 mg; Piridoxina (Vit. B6), 9,375 mg; Vit. B12, 0,0375 mg; Ac. Pantoteico, 25,0 mg; Colina, 2.220,0 mg; Niacina, 109,2188 mg; Ac. Fólico, 2,5 mg; Biotina, 0,5045 mg; Mn, 242,9572 mg; Se, 1,2722 ppm; Cu, 27,6456 ppm; Fe, 324,3881 ppm; Zn, 196,6846 ppm; I, 3,125 ppm. <sup>b</sup> Adsorbente de micotoxinas: Free-tox, Nutrex, Belgium. <sup>c</sup> Ceniza insoluble en ácido. <sup>d</sup> Fibra Neutro Detergente analizada con amilasa termoestable y expresada incluyendo cenizas residuales. <sup>e</sup> Fibra Acido Detergente.

Los granos utilizados en este trabajo se reconstituyeron a partir de granos secos (aproximadamente 11% humedad) se molieron a un tamaño de partícula de 3 mm y se les agregó agua para alcanzar una humedad del 35%. Luego se almacenaron en tarrinas de plástico de 50 L compactos y en anaerobiosis. Los granos para utilizar en las dietas secas se conservaron sin alterar como grano entero. Para preparar las dietas con los granos reconstituidos, se retiraba de las tarrinas la cantidad de granos fermentados necesaria para la preparación, e inmediatamente se volvían a tapar para mantener la anaerobiosis. Para preparar las dietas con los granos secos, en primera instancia se molían en un molino de martillo (JF 2D, JF Máquinas Agrícolas Ltda., Itapira, SP, Brasil) a 3 mm de tamaño de partícula. La mezcla de los granos molidos con el resto de los ingredientes, incluyendo el núcleo y el marcador de cenizas insolubles en ácido, se realizó manualmente en las proporciones ya mencionadas. Se

preparaba lo justo día a día para evitar el deterioro, basándonos en la tabla de consumo diario del Manual de manejo de pollos Ross (Ross and Aviagen Brand. Especificaciones nutricionales, 2022).

## **Toma de muestras**

Se tomaron muestras semanales de los granos ensilados, granos secos y dietas completas. Las muestras de granos ensilados y dietas completas se mantuvieron congeladas a -20°C hasta su análisis. Para el procesamiento se descongelaron en estufa de aire forzado a 60°C hasta peso constante. Luego todas las muestras fueron molidas en molino con un tamiz de 1 mm para análisis.

Durante 5 días se realizó el acostumbramiento a las dietas experimentales alimentándose *ad libitum* y posteriormente se colectaron muestras de excretas de cada jaula evitando las contaminadas con ración o plumas (no se hizo colecta total, ya que se utilizó un marcador de cenizas insolubles en ácido para calcular digestibilidad). Las excretas se recolectaron cada 12 horas durante 3 días. Las muestras de excretas se conservaron congeladas a -20°C hasta su procesamiento. Al final del ensayo las aves se sacrificaron por dislocación cervical para toma de muestras de variables no incluidas en este estudio. Para el procesamiento de las muestras de excretas, se descongelaron en estufa de aire forzado a 60°C hasta peso constante, fueron molidas en molino con un tamiz de 1 mm y se realizó un pool tomando 20 g de cada una de las muestras colectadas durante los 3 días de medición, las que se unieron por jaula para confeccionar una sola muestra compuesta por unidad experimental.

## **Análisis químicos**

Las muestras de granos, dietas completas de los tratamientos y excretas se analizaron según Association of Official Analytical Collaboration International (AOAC), (2000) para Materia seca (MS), Materia orgánica (MO), Proteína bruta (PB) y Extracto Etéreo (EE) (métodos 934.01, 967.05, 654.01 y 920.39, respectivamente). Para las muestras de granos y dietas completas se analizó también el contenido de Fibra bruta (FB) según Association of Official Analytical Collaboration International (AOAC), (2000) (método 978.10) y el contenido de Fibra neutro detergente (aFNDom) con de acuerdo con Mertens et al., (2002), utilizando alfa-amilasa termoestable y Sulfito de Sodio, expresada incluidas las cenizas residuales, en tanto la Fibra ácida detergente (FADom) fue realizada según Van Soest, Robertson y Lewis, (1991). El almidón de las muestras de granos, dietas completas y excretas se midió con un kit enzimático comercial (K-TSTA-100A, Megazyme International Ireland, Bray, Co. Wicklow, Irlanda). También se determinó el marcador de cenizas insolubles en ácido según método de Coca-Sinova et al., (2011) para determinar la digestibilidad según la siguiente fórmula:

Retención aparente total del tracto =  $1 - \left[ \left( \frac{\text{Nutriente excreta}}{\text{Nutriente alimento}} \right) \times \left( \frac{\text{Marcador de cenizas insolubles en ácido alimento}}{\text{Marcador de cenizas insolubles en ácido excreta}} \right) \right] \times 100$

También se midió el pH de los granos reconstituidos suspendiendo 5g de granos en 50 ml de agua destilada, utilizando un pHmetro digital (EW-59002-00; Cole Parmer, Singapur, Singapur).

### **Análisis estadístico**

Los datos se analizaron con el procedimiento PROC UNIVARIATE de SAS (SAS Institute Inc., 2024. SAS OnDemand for Academics. Cary, NC, USA) confirmando la normalidad de los datos. Los datos de digestibilidad y los parámetros de composición química se analizaron utilizando PROC MIXED de SAS siguiendo el modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + G_i + C_j + (G \times C)_{ij} + J_k + B_l + e_{ijkl}$$

donde  $\mu$  es la media,  $G_i$  es el efecto fijo del grano ( $i$ =maíz, sorgo 1 o sorgo 2),  $C_j$  es el efecto fijo del método de conservación ( $j$ =seco o reconstituido),  $(G \times C)_{ij}$  es la interacción entre el método de conservación y el grano,  $J_k$  es el efecto aleatorio de la jaula,  $B_l$  es el efecto aleatorio del bloque y  $e_{ijkl}$  es el error residual. La comparación entre medias se realizó utilizando el Test de Tukey y las medias se consideraron significativas cuando  $P < 0,05$ .

## RESULTADOS

La composición química de los granos de maíz y sorgo, secos y reconstituidos se presenta en el Cuadro 2. La reconstitución aumentó el contenido de PB ( $P<0,001$ ). El S2 presentó el menor valor de PB entre los granos ( $P=0,002$ ).

**Cuadro 2.** Efecto del grano (Maíz, Sorgo 1 y Sorgo 2) y la conservación (seco y reconstituido) sobre la composición química de los granos (g/100g MS).

Dieta		Composición Química <sup>d</sup>								
Grano	Conservación	MS	MO	EE	PB	Almidón	aFND	FAD	FB	pH
Maíz	Seco	87,4	98,5	3,93	7,96	73,4	9,70	2,88	1,37	-
	Reconstituido	64,2	98,4	4,02	9,03	71,8	6,23	1,61	0,624	4,23
Sorgo 1	Seco	88,0	98,5	2,87	7,82	69,4	15,0	8,23	1,34	-
	Reconstituido	64,0	98,5	3,05	9,24	67,9	9,36	6,92	1,24	4,47
Sorgo 2	Seco	86,5	98,7	1,27	7,03	67,2	12,3	8,85	1,43	-
	Reconstituido	64,2	98,5	3,09	8,22	69,1	11,4	8,08	1,11	4,55
EEM <sup>e</sup>		0,13	0,02	0,024	0,139	0,80	0,476	0,168	0,088	0,121
Efectos principales										
Grano:										
	Maíz	75,8a	98,5b	3,97a	8,50a	72,6a	7,97b	2,25c	0,998	
	Sorgo 1	76,0a	98,5b	2,96b	8,53a	68,7b	12,2a	7,58b	1,29	
	Sorgo 2	75,3b	98,6a	2,18c	7,62b	68,2b	11,8a	8,47a	1,27	
Conservación:										
	Seco	87,3	98,6	2,69	7,61	70,0	12,3	6,66	1,38	
	Reconstituido	64,1	98,4	3,39	8,83	69,6	8,99	5,54	0,990	
Significancia (P):										
	Grano (G)	0,010	0,006	<0,001	0,002	0,005	0,001	<0,001	0,318	0,049
	Conservación (C)	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,582	<0,001	<0,001	0,002	
	Interacción G x C	0,003	0,051	<0,001	0,492	0,126	0,012	0,299	0,305	

<sup>abc</sup>Las medias dentro de las columnas que no comparten superíndices comunes son significativamente diferentes. <sup>d</sup>MS= Materia seca, MO= Materia orgánica, EE= Extracto etéreo, PB=Proteína bruta, aFND= Fibra Neutro Detergente analizada con amilasa termoestable y expresada incluyendo cenizas residuales, FAD=Fibra ácido detergente, FB= Fibra bruta. <sup>e</sup>Error estándar de la media.

Por otro lado, no hubo diferencias en el contenido de almidón entre los granos con diferentes conservaciones ( $P=0,582$ ), por lo que la conservación no afectó su contenido. Con respecto al tipo de grano, el maíz presentó el mayor contenido de almidón comparado con los sorgos ( $P=0,005$ ), mientras que entre éstos últimos los niveles de almidón fueron similares. Los valores de pH obtenidos en los granos reconstituidos son diferentes ( $P=0,049$ ), siendo el maíz reconstituido el que llegó al menor valor. Los granos secos presentan valores más altos de MS ( $P<0,001$ ), aFND ( $P<0,001$ ), FAD ( $P=0,001$ ) y FB ( $P=0,002$ ), comparados con los granos reconstituidos.

**Cuadro 3.** Efecto del grano (Maíz, Sorgo 1 y Sorgo 2) y la conservación (seco y reconstituido) sobre la digestibilidad aparente del tracto digestivo total (g/100g MS) de MS (Materia seca), MO (Materia orgánica), EE (Extracto etéreo), PB (Proteína bruta) y Almidón.

Dieta		Digestibilidad aparente				
Grano	Conservación	MS	MO	EE	PB	Almidón
Maíz	Seco	70,9	73,9	86,1	67,7	98,4
	Reconstituido	74,1	77,4	91,6	72,8	99,1
Sorgo 1	Seco	72,9	75,3	89,5	66,0	97,6
	Reconstituido	74,0	77,1	93,5	69,9	99,4
Sorgo 2	Seco	66,9	69,9	86,0	59,1	97,9
	Reconstituido	77,3	79,9	93,6	74,4	99,6
EEM <sup>c</sup>		0,72	0,65	1,30	0,63	0,22
Efectos principales						
Grano:						
	Maíz	72,5	75,7	88,8b	70,2a	98,7
	Sorgo 1	73,4	76,2	91,5a	68,0ab	98,5
	Sorgo 2	72,1	74,9	89,8b	66,8b	98,7
Conservación:						
	Seco	70,2	73,0	87,2	64,3	97,9
	Reconstituido	75,1	78,1	92,9	72,4	99,4
Significancia (P):						
	Grano (G)	0,190	0,136	<0,001	0,030	0,509
	Conservación (C)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Interacción G x C	<0,001	<0,001	0,030	<0,001	0,031

<sup>ab</sup>Las medias dentro de las columnas que no comparten superíndices comunes son significativamente diferentes. <sup>c</sup>Error estándar de la media.

Los efectos principales de este trabajo, el efecto grano, el efecto de la conservación y su interacción en la digestibilidad de nutrientes, se presentan en el Cuadro 3. Se vio un efecto de la conservación en la digestibilidad de todos los nutrientes estudiados ( $P < 0,001$ ). La reconstitución aumentó la digestibilidad del almidón un 1,5% ( $P < 0,001$ ), de la PB un 8% ( $P < 0,001$ ), de la MS un 4,9% ( $P < 0,001$ ), de la MO un 5,1% ( $P < 0,001$ ) y del EE un 5,7% ( $P < 0,001$ ). La dieta con S2 reconstituido fue la que presentó mayores aumentos en la digestibilidad, comparada con el mismo grano seco, en casi todos los nutrientes (PB 15,3% ( $P < 0,001$ ), MS 10,4% ( $P < 0,001$ ), MO 10% ( $P < 0,001$ ) y EE 7,6% ( $P < 0,001$ )) mientras que en la digestibilidad del almidón fue la dieta con S1 reconstituido (1,8% ( $P < 0,001$ )). El efecto grano solo influyó en la digestibilidad del EE ( $P < 0,001$ ) y la PB ( $P = 0,030$ ).

## DISCUSIÓN

La reconstitución y ensilaje de los granos provocaron cambios en su composición química. El contenido de MS se redujo como era de esperar, ya que al agregar agua en el proceso de reconstitución aumenta la humedad de la masa ensilada (Mombach, Pereira, Pina, Bolson y Pedreira (2019).

El contenido de almidón de los granos en este estudio no mostró modificaciones, lo que puede ser explicado porque durante la fermentación, los microorganismos que proliferan (principalmente bacterias ácido-lácticas), utilizan azúcares como primer sustrato antes de usar almidón y otros carbohidratos fermentables (Canibe y Jensen, 2003). Probablemente es por eso por lo que la mayoría de los estudios que prueban diferentes tipos de fermentación espontánea han informado una reducción leve o nula del contenido de almidón del producto final (Canibe y Jensen, 2003).

La disminución general del contenido de fibra podría deberse a la capacidad de los organismos fermentadores para metabolizarla, ya que utilizan la fibra como fuente de carbono (Ojokoh y Bello, 2014). Según McDonald et al., (1991) la actividad enzimática en el material ensilado genera, a partir de la fibra, monosacáridos que posteriormente aportan azúcar adicional para la fermentación láctica.

El contenido de PB aumentó posterior a la fermentación al igual que a Ogodo, Ugbogu y Onyeagba, (2019) y Babalola y Giwa, (2012). Este cambio podría deberse a la actividad y al aumento de la carga de microorganismos fermentadores (Ojokoh, Daramola y Oluotiojokoh, 2013) que pueden haber producido proteínas a partir de los sustratos que conducen a un aumento de los aminoácidos (Dike y Odunfa, 2003).

En cuanto a la digestibilidad de los nutrientes, se observaron diferencias según las dietas utilizadas con diferentes conservaciones. La digestibilidad de la MS de las dietas formuladas con granos reconstituidos fue mayor a las dietas formuladas con los granos secos. Según Myer, Gorbet y Combs (1986) en un ensayo en cerdos, el ensilaje de sorgo de alta humedad mejora la digestibilidad de la MS. Estas mejoras podrían atribuirse a la inactivación de FAN presentes como sugieren con los taninos, Lopes et al., (2017), con los fitatos, Gibson et al., (2010) y con las kafirinas, Giuberti et al., (2014). En cuanto al maíz, Cruz-Polycarpo et al., (2014) en un ensayo *in vivo* en pollos de engorde, encontraron una mejora en la digestibilidad de la MS cuando incluyeron maíz ensilado en comparación con dietas de maíz seco. Es sabido que el maíz contiene también FAN como son los fitatos y los inhibidores de amilasa (Cowieson, 2004). La mejora en la digestibilidad de la MS probablemente se deba al proceso de ensilaje el cual reduce también su contenido (Ejigui, Savoie, Marin y Desrosiers, 2005 y Junges et al., 2017), logrando así un mayor valor nutricional.

La digestibilidad del almidón es alta en todos los tratamientos, pero muestra una ligera mejora con la reconstitución. El sorgo y el maíz se caracterizan por presentar una gran proporción de endospermo córneo, que dificulta el acceso de las enzimas al almidón (Rooney y Pflugfelder, 1986). El aumento de la digestibilidad observado en el sorgo reconstituido podría ser explicado por la acción de los ácidos

orgánicos durante el ensilaje, que promueven puntos de ruptura en la matriz proteica de Kafirina (Liu et al., 2015, Lopes et al., 2001, Sholly et al., 2011), mientras que otros autores han demostrado en el ensilaje de maíz, que es la actividad bacteriana epífita la mayor responsable de la proteólisis que degrada la matriz de zeínas (Junges et al., 2017), logrando así un mejor acceso al almidón. Además, según Tapiwa (2019), los taninos del sorgo inhiben la actividad de la amilasa, de modo que, si el proceso de ensilaje reduce su contenido (Lopes et al., 2017), también es posible que mejore la digestibilidad del almidón en los tratamientos ensilados.

Los FAN del sorgo reducen la digestibilidad de las proteínas (Humer et al., 2015; Liu et al., 2015; Tapiwa, 2019; Taylor et al., 2007), por lo que una reducción de estos como consecuencia del proceso de ensilaje (Gibson et al., 2010; Giuberti et al., 2014; Lopes et al., 2017; Mitaru et al., 1983) podría ser la razón del aumento de su digestibilidad en las dietas formuladas con sorgo reconstituido. Uno de ellos es el fitato que afecta la digestibilidad de las proteínas (Humer et al., 2015; Kies et al., 2006) y este se reduce durante el ensilaje (Gibson et al., 2010; Manwar y Mandal, 2008) mejorando también su digestibilidad y aumentando el valor nutricional de los granos reconstituidos. En nuestro estudio las mejoras en la digestibilidad alcanzaron un 3,9% y un 15,3% en SR1 y SR2 respectivamente, lo que muestra que el proceso de ensilaje logró mejorar notablemente la digestibilidad del S2, que cuando fue utilizado como grano seco en la dieta SS2, mostró los valores más bajos de digestibilidad, lo que nos hace pensar que podría tener mayor cantidad de FAN. Como se mencionó anteriormente, al igual que el sorgo, el maíz contiene FAN que también reducen su valor nutricional, entre los que se encuentran los fitatos y los inhibidores de amilasa (Cowieson, 2004). Su reducción a consecuencia del proceso de ensilaje (Ejigui, et al., 2005) puede ser la causa del aumento de la digestibilidad de las proteínas (Ogodo, Ugbo, Onyeagba y Okereke, 2017) en las dietas formuladas con el grano fermentado en nuestro estudio, en donde aumentó un 5,1% comparado con el grano seco.

Además de ver las diferencias en la digestibilidad de los granos reconstituidos en comparación con los granos secos, otro de nuestros objetivos fue comparar el aprovechamiento digestivo entre los sorgos y el maíz seco, para evaluar su potencial de sustitución en la alimentación avícola. Como vemos en este trabajo la composición química de los macronutrientes (PB, EE y almidón) del maíz seco y el S1 seco son similares, y las digestibilidades de las dietas formuladas con esos granos también, no así cuando es utilizado el S2 seco, donde se ve una menor digestibilidad de los nutrientes, por lo que es factible que contenga más cantidad de FAN que el S1. En este sentido, a la hora de pensar en una posible sustitución de maíz por sorgo, es necesario conocer el valor nutricional y el contenido de FAN. Investigaciones previas por ejemplo concluyeron que es posible sustituir el maíz por sorgo con bajo contenido en taninos, ya que su valor alimenticio es similar (Tandieng et al., 2014). Para los sorgos de mala calidad nutricional la reconstitución puede ser una buena opción para mejorar su digestibilidad.

## **CONCLUSIONES**

La reconstitución de granos secos de sorgo y maíz provocó cambios en su composición química y aumentó la digestibilidad de nutrientes en todos los casos al compararse con los mismos granos secos, dependiendo esta mejora del grano utilizado. Además, el proceso de fermentación de los granos provocó que el grano de sorgo alcanzara niveles de aprovechamiento digestivo similares y hasta mejores que el maíz al ser incluidos en dietas para pollos de engorde. Existen además variedades de sorgo que, sin tratamientos extras, a parte de la molienda, pueden sustituir al maíz. Son necesarios estudios de valoración nutricional y de composición química de diversas variedades de sorgo, complementados con investigaciones de performance productiva. Estos estudios permitirían no solo determinar la efectividad de la fermentación en diferentes variedades de sorgo, sino también evaluar si los incrementos en la digestibilidad de los granos están asociados a mejoras en los rendimientos productivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Estrada, B., Gutiérrez-Urbe, J., y Serna-Saldivar, S. (2019). Minor Constituents and Phytochemicals of the Kernel. En S. O. Serna-Saldivar, *Corn: Chemistry and Technology* (3ª ed., pp. 369-403). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00014-0>
- Adebo, J.A., Njobeh, P.B., Gbashi, S., Oyedeji, A.B., Ogundele, O.M., Oyeyinka, S.A., y Adebo, O., A. (2022). Fermentation of Cereals and Legumes: Impact on Nutritional Constituents and Nutrient Bioavailability. *Fermentation*, 8, 63. <https://doi.org/10.3390/fermentation8020063>
- Aguerre, M., Cajarville, C., y Repetto, J.L. (2015). Impact of water addition, germination, ensiling and their association on sorghum grain nutritive value. *Animal Feed Science and Technology*, 205, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.04.016>
- Ahmed, A. S., Alaeldein, M. A., Mutahar, H. A., y Tarek, A. E. (2019). The effects of replacing corn with low-tannin sorghum in broiler's diet on growth performance, nutrient digestibilities, lipid peroxidation and gene expressions related to growth and antioxidative properties, *Journal of Applied Animal Research*, 47(1), 532-539, <https://doi.org/10.1080/09712119.2019.1680377>
- Arcari, M. A., Martins, C. M. D. M. R., Tomazi, T., y dos Santos, M. V. (2016). Effect of the ensiling time of hydrated ground corn on silage composition and in situ starch degradability. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 53(1), 60-71.
- Association of Official Analytical Collaboration International. (2000). *Official Methods of Analysis* (17ªed.). Arlington: Association of Official Analytical Chemists.
- Awika, J.M., y Rooney, L.W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, 65(9), 1199-221. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.04.001>
- Babalola, R.O., y Giwa, O.E. (2012). Effect of fermentation on nutritional and anti-nutritional properties of fermenting Soy beans and the antagonistic effect of the fermenting organism on selected pathogens. *International Research Journal of Microbiology*, 3, 333-338.
- Balogun, R.O., Rowe, J.B., y Bird, S.H. (2005). Fermentability and degradability of sorghum grain following soaking, aerobic or anaerobic treatment. *Animal Feed Science and Technology*, 120(1-2), 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.01.005>.
- Barcellos, L.C.G., Furlan, A.C., Murakami, A.E., da Silva, M.A.A., y da Silva, R.M. (2006). Nutritional evaluation of high or low content sorghum grain silage of tannin for broiler chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(1), 104-112. <https://doi.org/10.1590/s1516-35982006000100013>

- Barros, F., Awika, J. M., y Rooney, L. W. (2012). Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on in vitro starch digestibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(46), 11609-11617. <https://doi.org/10.1021/jf3034539>
- Bean, S.R., Zhu, L., Smith, B.M., Wilson, J.D., Ioerger, B.P., y Tilley, M. (2019). Starch and protein chemistry and functional properties. En J.R.N. Taylor y K. Duodu (Eds.), *Sorghum and Millets: Chemistry and technology* (2ª ed., pp. 131-170). San Diego: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00006-X>.
- Belton, P.S., Delgadillo, I., Halford, N. G., y Shewry, P.R. (2006). Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 272-286. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.05.004>.
- Bergamaschine, A. F., Passipiéri, M., Veriano Filho, W. V., Isepon, O. J., y Correa, L. (2006). Qualidade e valor nutritivo de silagens de capim-marandu (B. brizantha cv. Marandu) produzidas com aditivos ou forragem emurchecida. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(4), 1454-1462. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000500027>
- Blakely, M.E., Rooney, L.W., Sullins, R.D., y Miller, F.R. (1979). Microscopy of the Pericarp and the Testa of Different Genotypes of Sorghum 1. *Crop Science*, 19, 837-842. <https://doi.org/10.2135/cropsci1979.0011183x001900060023x>
- Boren, B., y Waniska, R. D. (1992). Sorghum seed color as an indicator of tannin content. *Journal of Applied Poultry Research*, 1(1), 117-121. <https://doi.org/10.1093/japr/1.1.117>.
- Brambillasca, S., Fernández García, M., Aguerre, M., Repetto, J., y Cajarville, C. (2019). Characterization of the in vitro digestion of starch and fermentation kinetics of dry sorghum grains soaked or rehydrated and ensiled to be used in pig nutrition. *Journal of Cereal Science*, 89, 102817. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102817>
- Brambillasca, S., Fernández García, M., Arroyo, J., Repetto, J., y Cajarville, C. (2018). Chemical composition and in vitro digestion of reconstituted and ensiled sorghum grains for pig feeding. *Journal of Animal Science*, 96(3), 292-292. <https://doi:10.1093/jas/sky404.642>
- Cámara Uruguaya de Procesadores Avícolas. (En prensa). *Situación actual y desafíos del Sector de carne aviar 2020-2024*. Montevideo: INAC.
- Canibe, N., y Jensen, B. B. (2003). Fermented and non fermented liquid feed to growing pigs: effect on aspects of gastrointestinal ecology and growth performance. *Journal of Animal Science*, 81(8), 2019-2031. <https://doi.org/10.2527/2003.8182019x>
- Cowieson, A. (2004). Factors that affect the nutritional value of maize for broilers. *Animal Feed Science and Technology*, 119, 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.12.017>

- Cruz-Polycarpo, V., Sartori, J., Gonçalves, J., Pinheiro, D., Madeira, L., Polycarpo, G., ... Pezzato, A. (2014). Feeding high-moisture corn grain silage to broilers fed alternative diets and maintained at different environmental temperatures. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 16(4), 448-457. <https://doi.org/10.1590/1516-635X1604449-458>
- de Coca-Sinova, A., Mateos, G. G., González-Alvarado, J. M., Centeno, C., Lázaro, R., y Jiménez-Moreno, E. (2011). Comparative study of two analytical procedures for the determination of acid insoluble ash for evaluation of nutrient retention in broilers. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 761-768. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-439-10>
- de Wet, J. M. J. (1978). Systematics and Evolution of Sorghum Sect. Sorghum (Gramineae). *American Journal of Botany*, 65(4), 477-484. <https://doi.org/10.2307/2442706>
- Dei, H.K. (2017). Assessment of maize (*Zea mays*) as feed resource for poultry. *Poultry Science*, 1, 1-32. <http://dx.doi.org/10.5772/65363>
- Dike, E.N., y Odunfa, S. A. (2003). Microbiological and biochemical evaluation of a fermented soybean product Soya daddawa. *Journal of Food Science and Technology*, 20, 606-609.
- Doherty, C., Faubion, J., y Rooney, W. (1982). Semi-automatic determination of phytate in sorghum and sorghum products. *Cereal Chemistry*, 59, 373-378.
- Domanski, C., Giorda, L. M., y Feresin, O. (1997). Composición y calidad del grano de sorgo. [https://www.produccion-animal.com.ar/informacion\\_tecnica/suplementacion/42-calidad\\_y\\_composicion\\_del\\_grano\\_de\\_sorgo.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/suplementacion/42-calidad_y_composicion_del_grano_de_sorgo.pdf)
- Dunmire, K. M., Stark, C.S., y Paulk, C. B. (2021). *Quality feed manufacturing guide: Particle size*. Kansas State University. Recuperado de [https://www.grains.k-state.edu/research/AnimalFeedandPetFood/feed\\_science\\_research\\_extension/quality\\_assurance\\_guidelines\\_resources/1.2%20Particle%20Size%20Reduction\\_FORMATTED.pdf](https://www.grains.k-state.edu/research/AnimalFeedandPetFood/feed_science_research_extension/quality_assurance_guidelines_resources/1.2%20Particle%20Size%20Reduction_FORMATTED.pdf)
- Duodu, G., Taylor, J.R.N., Belton, P., y Hamaker, B.R. (2003). Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, 38, 117-131. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00016-X)
- Duran, V., Hernández, E., Aguirre, E., y Gorga, L. (2020). En Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (Ed.), *Anuario Oficina de Programación y Política Agropecuaria* (pp.100-105). Montevideo: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Recuperado de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/book/12366/download>
- Dykes, L., Peterson, G.C., Rooney, W.L., y Rooney, L.W. (2011). Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. *Food Chemistry*, 128(1), 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.020>

- Dykes, L., y Rooney, L. W. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants, *Journal of Cereal Science*, 44 (3), 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.007>.
- Earp, C.F., McDonough, C.M., Awika, J., y Rooney, L.W. (2004). Testa development in the caryopsis of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Journal Cereal Science*, 39(2), 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.11.005>
- Ejigui, J., Laurent, S., Marin, J., y Desrosiers, T. (2005). Beneficial changes and drawbacks of a traditional fermentation process on chemical composition and antinutritional factors of yellow maize (*Zea mays*). *Journal of Biological Sciences*, 5(5), 590-596. <http://dx.doi.org/10.3923/jbs.2005.590.596>
- Farré, I., y Faci, J.M. (2006). Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 83(1-2), 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.001>
- Food and Agriculture Organization. (2023). *Food Outlook, Biannual report on global food markets*. Rome: Food and Agriculture Organization. <https://doi.org/10.4060/cc8589en>
- Food and Agriculture Organization Statistic. (s.f.). *Producción. Cultivos*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Frederiksen, R.A. (1986). *Compendium of Sorghum Diseases*. Minnesota: American Phytopathological Society.
- Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. (2023). Recuperado de [https://www.fundacionfedna.org/granos\\_de\\_cereales](https://www.fundacionfedna.org/granos_de_cereales)
- Garcia, R. G., Mendes, A. A., Sartori, J. R., Paz, I. D. L. A., Takahashi, S. E., Pelícia, K., y Quinteiro, R. R. (2004). Digestibility of feeds containing sorghum, with and without tannin, for broiler chickens submitted to three room temperatures. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 6, 55-60. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2004000100007>
- Gibson, R.S., Bailey, K.B., Gibbs, M., y Ferguson, E.L. (2010). A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food And Nutrition Bulletin*, 31(2), 134-146. <https://doi.org/10.1177/15648265100312S206>
- Giuberti, G., Gallo, A., Masoero, F., Ferraretto, L., Hoffman, P., y Shaver, R. (2014). Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review. *Starch - Stärke*, 66, 72-90. <https://doi.org/10.1002/STAR.201300177>
- Gollcher, A., Lima, J., Fialho, E., Rodrigues, P., y de Lima, R. (2010). Nutritional value of high and low tannin high-moisture sorghum grain silage in horses. *Revista*

- Brasileira De Zootecnia*, 39(6), 1246-1251. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982010000600012>
- Gonçalves, J. C., Sartori, J. R., da Cruz, V. C., Pinheiro, D. F., Pelícia, V. C., y Costa, C. (2007). Desempenho e digestibilidade de nutrientes em frangos de corte alternativos alimentados com silagem de grãos úmidos de sorgo. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 29(3), 283-290. <http://dx.doi.org/10.4025/actascianimsci.v29i3.557>
- Goodarzi Boroojeni, F., Vahjen, W., Mader, A., Knorr, F., Ruhnke, I., Röhe, I., ... Zentek, J. (2014). The effects of different thermal treatments and organic acid levels in feed on microbial composition and activity in gastrointestinal tract of broilers. *Poultry Science*, 93(6), 1440-1452. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03763>
- Gorga, L. (2023). *Cadena avícola de carne: situación y perspectivas. Análisis sectorial y cadenas productivas*. Recuperado de <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2023/cp/4/cp4web/C4Cadenaavicoladecarne.pdf>
- Gualtieri, M., y Rapaccini, S. (1990). Sorghum grain in poultry feeding. *World's Poultry Science Journal*, 46(3), 246-254. [doi:10.1079/WPS19900024](https://doi.org/10.1079/WPS19900024)
- Healy, B.J., Bramel-Cox, P. J., Kennedy, G. A., Hancock, J.D., y Behnke, K.C. (1991). Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum grain for nursery pigs and broiler chicks. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 0(10), 56-62. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.6331>
- Hossain, S., Islam, N., Rahman, M., Mostofa, M. G., y Khan, A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100300>.
- Humer, E., Schwarz, C., y Schedle, K. (2015). Phytate in pig and poultry nutrition. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 99, 605-625. <https://doi.org/10.1111/jpn.12258>
- Huntington, G.B. (1997). Starch Utilization by Ruminants: From Basics to the Bunk. *Journal of Animal Science*. 75, 852-867. <https://doi.org/10.2527/1997.753852x>
- Instituto Nacional de Carnes. (2023). *Consumo de carnes en Uruguay*. Recuperado de <https://www.inac.uy/innovaportal/file/18275/1/cierre-del-consumo-de-carnes.pdf>
- Instituto Nacional de Carnes. (2024). *Volúmenes comercializados*. Recuperado de <https://www.inac.uy/innovaportal/v/17946/37/innova.bs/volumenes-comercializados>
- Irigoyen, A., y Perrachon, J. (2007). Sorgo granifero. *Revista Plan Agropecuario*, 123, 52-55. Recuperado de [https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R123/R123\\_52.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R123/R123_52.pdf)

- Junges, D., Morais, G., Spoto, M.H.S., Santos, P.S., Adesogan, A.T., Nussio, L.G., y Daniel, J.L.P. (2017). Short communication: Influence of various proteolytic sources during fermentation of reconstituted corn grain silages. *Journal of Dairy Science*, 100(11), 9048 - 9051. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12943>
- Khaton, M.A., Sagar, A., Tajkia, J.E., Islam, M. S., Mahmud, M.S., y Hossain, A. K. M. Z. (2016). Effect of moisture stress on morphological and yield attributes of four sorghum varieties. *Progressive Agriculture*, 27(3), 265-271. <https://doi.org/10.3329/pa.v27i3.30806>
- Kies, A. K., De Jonge, L. H., Kemme, P. A., y Jongbloed, A. W. (2006). Interaction between protein, phytate, and microbial phytase. In vitro studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(5), 1753-1758.
- Kumar, V., Elangovan, A. V., Mandal, A. B., Tyagi, P. K., Bhanja, S. K., y Dash, B. B. (2007). Effects of feeding raw or reconstituted high tannin red sorghum on nutrient utilization and certain welfare parameters of broiler chickens. *British Poultry Science*, 48(2), 198-204. <https://doi.org/10.1080/00071660701251089>
- Liu, N., Ru, Y.J., Li, F.D., y Cowieson, A.J. (2008). Effect of diet containing phytate and phytase on the activity and messenger ribonucleic acid expression of carbohydrase and transporter in chickens. *Journal of Animal Science*, 86(12), 3432-3439. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1234>
- Liu, S., Fox, G., Khoddami, A., Neilson, K., Truong, H., Moss, A., y Selle, P. (2015). Grain Sorghum: A Conundrum for Chicken-Meat Production. *Agriculture*, 5(4), 224-251. <https://doi.org/10.3390/agriculture5041224>
- Liu, S. Y., Selle, P.H., y Cowieson, A.J. (2013). Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on sorghum-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 181(1-4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.01.008>
- Lopes, A.B.R. de C., Berto, D.A., Costa, C., Baldassa, M.H.M., y de Magalhaes, G.J.R. (2001). Silagem de grãos úmidos de milho para suínos nas fases de crescimento e terminação. *Boletim de Indústria Animal*, 58(2), 191-200. <http://35.198.24.243/index.php/bia/article/view/1384>
- Lopes, A.B.R. de C., Tse, M.L.P., Silva, A.M.R. da., Trindade Neto, M.A. da., Pereira, C.S., Saleh, M. A.D., y Berto, D.A. (2017). High-moisture sorghum grain silage with low- and high-tannin contents for weanling piglets. *Ciência Rural*, 47(4). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151255>
- Mahasukhonthachat, K., Sopade, P. A., y Gidley, M. J. (2010). Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size. *Journal of Food Engineering*, 96(1), 18-28. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.06.051>
- Manwar, S.J., y Mandal, A.B. (2008) Availability of certain nutrients in cereals reconstituted with or without enzymes for chickens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 699-706. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3138>
- Mateos, G. G., Cámara, L., de Juan, A.F., y Fondevila, G. (2019). Factores anti nutricionales de los ingredientes y su impacto en alimentación de aves y

- porcinos. En Ciudad Universitaria (Ed.), *Curso de especialización FEDNA* (Vol. XXXV, pp. 113-132). Recuperado de [https://oa.upm.es/64962/1/INVE MEM 2019 322747.pdf](https://oa.upm.es/64962/1/INVE_MEM_2019_322747.pdf)
- McDonald, P., Edwards, R.A., Greenhalgh, J.F.D., Morgan, C.A., Sinclair, L.A., y Wilkinson, R.G. (2010). Silagen. En *Animal Nutrition* (7ª ed., pp.499-520). Edinburgh: Pearson.
- McDonald, P., Henderson, A.R., y Heron, S.J.E. (1991). *The Biochemistry of Silage* (2ª ed.). Marlow: Chalcombe.
- Mertens, D. R. (2002). Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 85(6), 1217-1240.
- Methol, M. (2021). Maíz y sorgo. En Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (Ed.), *Anuario Oficina de Programación y Política Agropecuaria* (pp.193-208). Montevideo: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Recuperado de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/book/14325/download>
- Methol, M., y Pizzanelli, M. (2022). *Maíz y sorgo: situación y perspectivas. Análisis sectorial y cadenas productivas*. En Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (Ed.), *Anuario Oficina de Programación y Política Agropecuaria* (pp.237-256). Montevideo: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Recuperado de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/book/16089/download>
- Mitaru, B.N., Reichert, R.D., y Blair, R. (1983). Improvement of the nutritive value of high tannin sorghums for broiler chickens by high moisture storage (reconstitution). *Poultry Science*, 62(10), 2065-2072. <https://doi.org/10.3382/ps.0622065>
- Mohapatra, D., Patel, A.S., Kar, A., Deshpande, S.S., y Tripathi, M.K. (2019). Effect of different processing conditions on proximate composition, anti-oxidants, anti-nutrients and amino acid profile of grain sorghum. *Food Chemistry*, 271, 129-135. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.196>
- Mombach, M. A., Pereira, D. H., Pina, D. S., Bolson, D. C., y Pedreira, B. C. (2019). Silage of rehydrated corn grain. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 71(3), 959-966. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9676>
- Mundia, C.W., Secchi, S., Akamani, K., y Wang, G. (2019). A Regional Comparison of Factors Affecting Global Sorghum Production: The Case of North America, Asia and Africa 's Sahel. *Sustainability*, 11(7), 2135. <https://doi.org/10.3390/su11072135>
- Myer, R. O., Gorbet, D. W., y Combs, G. E. (1986). Nutritive value of high-and low-tannin grain sorghums harvested and stored in the high-moisture state for growing-finishing swine. *Journal of Animal Science*, 62(5), 1290-1297.

- Nir, I., Hillel, R., Shefet, G., y Nitsan, Z. (1994). Effect of grain particle size on performance. 2. Grain texture interactions. *Poultry Science*, 73(6), 781-791. <https://doi.org/10.3382/ps.0730781>
- Nyamambi, B., Ndlovu, L.R., Read, J.S., y Reed, J.D. (2000). The effects of sorghum proanthocyanidins on digestive enzyme activity in vitro and in the digestive tract of chicken. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 2223-2231. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200012\)80:15%3C2223::AID-JSFA768%3E3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200012)80:15%3C2223::AID-JSFA768%3E3.0.CO;2-I)
- Ogodo, A., Ugbogu, O., Onyeagba, R.A., y Okereke, H.C. (2017). Effect of Lactic Acid Bacteria Consortium Fermentation on the Proximate Composition and in-Vitro Starch/Protein Digestibility of Maize (Zea mays) flour. *American Journal of Microbiology and Biotechnology*, 4(4), 35-43.
- Ogodo, A.C., Ugbogu, O.C., y Onyeagba, R.A. (2019). Microbiological quality, proximate composition and in vitro starch/protein digestibility of Sorghum bicolor flour fermented with lactic acid bacteria consortia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0145-4>
- Ojokoh, A.O., Daramola, M.K., y Oluotiojokoh, O.J. (2013) Effect of fermentation on nutrient and anti-nutrient composition of breadfruit (*Treculia africana*) and cowpea (*Vigna unguiculata*) blend flours. *African Journal of Agricultural*, 8(27), 3566-3570. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1944>
- Ojokoh, A., y Bello, B. (2014). Effect of Fermentation on Nutrient and Anti-nutrient Composition of Millet (*Pennisetum glaucum*) and Soyabean (*Glycine max*) Blend Flours. *Journal of Life Sciences*, 8(8), 668-675.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Perspectivas Agrícolas 2023-2032*. Paris: OCDE y FAO. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- Oria, M.P., Hamaker, B.R., & Schull, J.M. (1995). In vitro protein digestibility of developing and mature sorghum grain in relation to  $\alpha$ -,  $\beta$ -, and  $\gamma$ -kafirin disulfide crosslinking, *Journal of Cereal Science*, 22(1), 85-93. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(05\)80010-4](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(05)80010-4)
- Paliwal, R.L. (2001). *Usos del maíz*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/x7650s/x7650s08.htm#TopOfPage>
- Peter, C., M., Han, Y., Boling-frankenbach, S.D., Parsons, C.M., & Baker, D.H. (2000). Limiting order of amino acids and the effects of phytase on protein quality in maize gluten meal fed to young chicks. *Journal Animal Science*, 78, 2150-2156. <https://doi.org/10.2527/2000.7882150x>
- Pizzanelli, M. (2023). *Maíz y sorgo: situación y perspectivas*. Recuperado de <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2023/CP/9/CP9web/CP9Maizysorgo.pdf>

- Ring, S.G., Gee, J.M., Whittam, M., Orford, P., y Jhonson, I.T. (1988). Resistant starch: Its chemical form foodstuffs and effect on digestibility in vitro. *Food Chemistry*, 28(2), 97-109. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(88\)90139-2](https://doi.org/10.1016/0308-8146(88)90139-2).
- Rooney, L.W., y Pflugfelder, R.L. (1986). Factors Affecting Starch Digestibility with Special Emphasis on Sorghum and Corn, *Journal of Animal Science*, 63(5), 1607-1623. <https://doi.org/10.2527/jas1986.6351607x>
- Ross. (2022). *Especificaciones nutricionales. Pollos de engorde*. Recuperado de [https://aviagen.com/assets/Tech\\_Center/BB\\_Foreign\\_Language\\_Docs/Spanish\\_TechDocs/Ross-BroilerNutritionSpecifications2022-ESEU.pdf](https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Ross-BroilerNutritionSpecifications2022-ESEU.pdf)
- Rovira, P., y Velazco, J. (2012). *Ensilaje de grano húmedo de sorgo: Guía práctica para su uso en la alimentación de ganado en regiones ganaderas*. Montevideo: INIA. Recuperado de <http://www.inia.uy/publicaciones/documentos%20compartidos/18429110612095450.pdf>
- Sage, R. F., y Zhu, X. G. (2011). Exploiting the engine of C (4) photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 62(9), 2989-3000. <https://doi.org/10.1093/jxb/err179>
- Samtiya, M., Aluko, R.E., y Dhewa. T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 6. <https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5>
- Selle. P.H. (2011). The protein quality of sorghum. En Poultry Research Foundation, y Word's Poultry Science Association (Ed.), *Annual Australian Poultry Science Symposium*, (Vol. 22, pp. 147-160). Sydney: Poultry Research Foundation, Word's Poultry Science Association.
- Selle, P. H., Cadogan, D. J., Li, X., y Bryden, W. L. (2010). Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 156(3-4), 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.01.004>
- Selle, P.H., Cowieson, A.J., Cowieson, N.P., y Ravindran, V. (2012). Protein-phytate interactions in pig and poultry nutrition: A reappraisal. *Nutrition Research Reviews*, 25(1), 1-17. <https://doi.org/10.1017/S0954422411000151>
- Selle, P., McInerney, B., McQuade, L., Khoddami, A., Chrystal, P., Hughes, R.J., y Liu, S. (2020). Composition and characterisation of kafirin, the dominant protein fraction in grain sorghum. *Animal Production Science*, 60(9), 1163-1172. <http://dx.doi.org/10.1071/AN19393>
- Selle, P., & Ravindran, V. (2007). Microbial phytase in poultry nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 135, 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010>
- Serna-Saldivar, S.O., & Espinosa-Ramírez, J. (2019). Grain structure and grain chemical composition. En J.R.N. Taylor y K.G. Duodu (Eds.), *Sorghum and Millets* (2ª ed., pp. 85-129). Pretoria: Woodhead Publishing and AACC International Press <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00005-8>

- Sholly, D.M., Jørgensen, H., Sutton, A.L., Richert, B.T., y Bach Knudsen, K.E. (2011). Effect of fermentation of cereals on the degradation of polysaccharides and other macronutrients in the gastrointestinal tract of growing pigs. *Journal Animal Science*, 89(7), 2096-2105. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-2891>
- Stevnebø, A., Sahlström, S., y Svihus, B. (2006). Starch structure and degree of starch hydrolysis of small and large starch granules from barley varieties with varying amylose content. *Animal Feed Science Technology*, 130(1-2), 23-38. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.01.015>
- Tacon, A. G. J. (1995). *Factores antinutricionales endógenos presentes en los productos alimenticios vegetales*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/T0700S/T0700S06.htm>
- Taleon V., Dykes L., Rooney W.L., y Rooney L.W. (2012). Effect of genotype and environment on flavonoid concentration and profile of black sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, 56, 470-475. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.05.001>.
- Tandieng, D. M., Diop, M. T., Dieng, A., Yoda, G. M. L., Cisse, N., y Nassim, M. (2014). Effect of corn substitution by sorghum grain with low tannin content on broilers production: Animal performance, nutrient digestibility and carcass characteristics. *International Journal of Poultry Science*, 13(10), 568. <http://dx.doi.org/10.3923/ijps.2014.568.574>
- Tapiwa, K.A. (2019). Polyphenols in sorghum, their effects on broilers and methods of reducing their effects: A review. *Biomedical Journal of Scientific y Technical Research*, 19(1), 14058-14061.
- Taylor, J.R.N. (2005). Non-starch polysaccharides, protein and starch: Form function and feed-highlight on sorghum. En The Poultry Research Foundation y The World's Poultry Science Association (Eds.), *Proceeding of Australian Poultry Science Symposium* (Vol. 17, pp. 9-16). Sydney: The Poultry Research Foundation y The World's Poultry Science Association. Recuperado de <https://poultry-research.sydney.edu.au/wp-content/uploads/2023/05/APSS-2005.pdf>
- Taylor, J.R.N. (2018). Taxonomy, history, distribution and production. En J.R.N. Taylor y K.G. Duodu (Eds.), *Sorghum and millets chemistry, technology, and nutritional attributes* (2ª ed., pp. 1-21). Pretoria: Elsevier.
- Taylor, J., Bean, S., Ioerger, B., y Taylor, J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.11.001>.
- Truong, H.H., Liu, S.Y., y Selle, P.H. (2016). Starch utilization in chicken meat production: The main influencing factors. *Animal Production Science*, 56, 797-814. <https://doi.org/10.1071/AN15056>

- Truong, H.H., Neilson, K.A., McInerney, B. V., Khoddami, A., Roberts, T.H., Cadogan, D.J., ... Selle, P.H. (2017). Comparative performance of broiler chickens offered nutritionally equivalent diets based on six diverse, "tannin-free" sorghum varieties with quantified concentrations of phenolic compounds, kafirin, and phytate. *Animal Production Science*, 57, 828-838. <https://doi.org/10.1071/AN16073>
- United States Department of Agriculture. (2024). *Livestock and Poultry: World Markets and Trade*. Recuperado de [https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock\\_poultry.pdf](https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf)
- United States Grains Council. (2021). Informe de la calidad del maíz para la exportación. Recuperado de [https://grains.org/ita/wp-content/uploads/sites/6/2021/08/CornExportReport2020-2021\\_ESP\\_final.pdf](https://grains.org/ita/wp-content/uploads/sites/6/2021/08/CornExportReport2020-2021_ESP_final.pdf)
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., y Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Waniska, R.D. (2000). Structure, phenolic components and antifungal protein of sorghum. *Journal of Food Protection*, 64, 361-366.
- Waniska, R.D., Poe, J.H., y Bandyopadhyay, R. (1989). Effects of growth conditions on grain molding and phenols in sorghum caryopsis. *Journal of Cereal Science*, 10(3), 217-225. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(89\)80051-7](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(89)80051-7).
- Welsch, C.A., Lachance, P.A., y Wasserman, B.P. (1989). Dietary phenolic compounds: Inhibition of Na<sup>+</sup>-Dependent D-Glucose uptake in rat intestinal brush border membrane vesicles. *The Journal of Nutrition*, 119(11), 1698-1704. <https://doi.org/10.1093/jn/119.11.1698>.
- Zentek, J., y Goodarzi, B. F. (2020). (Bio) Technological processing of poultry and pig feed: Impact on the composition, digestibility, anti-nutritional factors and hygiene. *Animal Feed Science and Technology*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114576>
- Zhang, G., Ao, Z., y Hamaker, B. R. (2006). Slow digestion property of native cereal starches. *Biomacromolecules*, 7(11), 3252-3258. <https://doi.org/10.1021/bm060342i>
- Zhu, F. (2015). Interactions between starch and phenolic compound. *Food Science and Technology*, 43(2), 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.003>.