



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA  
SALUD ANIMAL

EFFECTO DE LA INTERACCIÓN DE LOS TANINOS Y KAFIRINAS DEL SORGO  
SOBRE EL ÍNDICE GLICÉMICO, LA DIGESTIBILIDAD ILEAL Y EL BALANCE DE  
NITRÓGENO EN CERDOS DE FINALIZACIÓN

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA:  
**IRIS ELISA ÁVILA ARRES**

TUTOR PRINCIPAL  
GERARDO MARISCAL LANDÍN  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUATITLÁN-UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR  
TÉRCIA CESÁRIA REIS DE SOUZA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

SERGIO GÓMEZ ROSALES  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUATITLÁN-UNAM

MÉXICO DF., FEBRERO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIAS**

A Pepe por estar en cada momento, y por ser parte de esa fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mis padres por todo el apoyo, esfuerzos y amor incondicional.

A Beto, Erika, Dani, Lalo y Andreita por todo su cariño y recibirme siempre con una sonrisa.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me ha formado como profesionista.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización del posgrado.

Al Dr. Gerardo Mariscal por su ayuda, confianza y motivación para terminar este trabajo.

A mi comité tutor, la Dra. Tercía y el Dr Sergio por sus aportaciones durante la realización del experimento.

A los miembros del jurado por sus aportaciones en la revisión de este trabajo.

A mis profesores del CENID Fisiología.

A las Químicas Erica y Devi y a Don José por su ayuda en el análisis de las muestras.

A Nancy por tu amistad incondicional durante estos años y por toda tu ayuda en la realización del experimento y a José Gómez por tu ayuda durante el experimento.

## RESUMEN

El sorgo es uno de los granos más utilizados en la alimentación animal en México. Sin embargo, posee factores que disminuyen su calidad nutricional; por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de los taninos y kafirinas del sorgo sobre los coeficientes de digestibilidad ileal aparente (CDIA), el balance de energía y nitrógeno y metabolitos plasmáticos en cerdos en crecimiento. Se evaluaron dos variedades de sorgos, bajos y altos en taninos, cada uno con dos niveles de kafirinas; bajos y altos. Se formularon cuatro dietas con sorgo como único ingrediente. En el experimento 1 se utilizaron cuatro cerdos de 25 kg, canulados a nivel ileal para determinar los CDIA de los sorgos. En el experimento 2 se cateterizaron en la vena yugular cuatro cerdos de 26 Kg para determinar la glucosa y urea plasmática. Y en el experimento 3 se utilizaron cinco cerdos de 48 kg para determinar el balance de nitrógeno y energía de los cuatro sorgos (dietas sorgo-pasta de soya) obtenidos y una dieta control (maíz-pasta de soya). Los CDIA de materia seca, energía (E), proteína cruda (PC), almidón, amilopectina y de los aminoácidos ácido aspártico, treonina, leucina, lisina, histidina, cisteína y metionina fueron más bajos en los cerdos que consumieron sorgos altos en taninos ( $P \leq 0.05$ ). Además, los taninos disminuyeron la digestibilidad fecal de MS y la E ( $P \leq 0.0001$ ) y los valores plasmáticos de glucosa ( $P \leq 0.10$ ) y urea ( $P \leq 0.05$ ). El nivel de kafirinas afectó negativamente los CDIA de ácido glutámico e histidina ( $P \leq 0.05$ ), y alanina, valina, ácido aspártico ( $P \leq 0.10$ ). Sin embargo, no afectaron los CDIA de la PC, los valores plasmáticos de urea o glucosa ni la retención de nitrógeno o la utilización de la energía. Aunque la interacción con los taninos disminuyó los CDIA de ácido glutámico, lisina ( $P \leq 0.05$ ), ácido aspártico, valina, tirosina y metionina ( $P \leq 0.10$ ) y la retención de nitrógeno ( $P \leq 0.10$ ). Los CDIA de glicina y prolina fueron negativos en todas las dietas. Leucina, ácido glutámico, metionina y fenilalanina tuvieron los CDIA más altos y arginina, treonina y cisteína fueron los menos digestibles. En general, en la dieta baja taninos- baja en kafirinas se observaron los más altos CDIA de aminoácidos, así como los mayores niveles

plasmáticos de glucosa, y de nitrógeno retenido y digestibilidad fecal de MS y E. Estos resultados indican que los taninos del sorgo modifican la utilización de la proteína y energía de la dieta. Sin embargo, las kafirinas tuvieron efectos mínimos sobre los criterios estudiados.

**PALABRAS CLAVE:** Sorgo, taninos, kafirinas, cerdos

## ABSTRACT

Sorghum grain is one of the most widely used in animal feed in Mexico. However, the presence of antinutritional factors decrease its nutritional quality. Therefore, the aim of this study was evaluate the effect of tannins and kafirins of sorghum on coefficients of apparent ileal digestibility (CDIA), energy and nitrogen balance and plasma metabolites in growing pigs. Two varieties of sorghum (low and high tannin), each one with two kafirins levels (low and high), were evaluated. Four diets were formulated with sorghum as a single ingredient. In Experiment 1, four cannulated pigs were used to determine the CDIA of sorghum. In experiment 2, the same sorghum-based diets were offered to four pigs catheterized in jugular vein to determine plasma glucose and urea. In Experiment 3, five pigs weighing 48 kg were used to determine nitrogen and energy balance using sorghum-soybean meals diets and a control diet (corn-soybean meal). The CDIA of dry matter (DM), energy (E), crude protein (CP), starch, amylopectin, aspartic acid, threonine, leucine, lysine, histidine, cysteine and methionine were lower in pigs fed high sorghum tannins ( $P \leq 0.05$ ). Tannins also decreased ( $P \leq 0.0001$ ) DM and E fecal digestibility, and plasmatic glucose ( $P \leq 0.10$ ) and urea ( $P \leq 0.05$ ) values. Kafirins negatively affected CDIA of glutamic acid and histidine ( $P \leq 0.05$ ) and alanine, valine, and aspartic acid ( $P \leq 0.10$ ). However, kafirins did not affect CDIA of PC, glucose and urea plasmatic levels, nitrogen retention or metabolizable energy. Although interaction kaffirin:tannins decreased CDIA of glutamic acid, lysine ( $P \leq 0.05$ ), aspartic acid, valine, tyrosine and methionine ( $P \leq 0.10$ ) and nitrogen retention ( $P \leq 0.10$ ). The CDIA of glycine and proline were negative in all diets. Leucine, glutamic acid, methionine, and phenylalanine were the most digestible amino acids. Arginine, threonine and cysteine were the less digestible amino acids. Overall, low tannins-low kafirinas diets had the highest amino acids CDIA and the higher glucose plasmatic levels, nitrogen retained and fecal digestibility of DM and E. These results indicated that sorghum tannins modify the use of protein and energy diet; however, kafirins had minimal effects.

## CONTENIDO

Dedicatorias.....	II
Agradecimientos.....	III
Resumen.....	IV
Abstract.....	VI
Índice de cuadros.....	IX
Índice de figuras.....	X
1. Introducción.....	1
2. Revisión de la literatura.....	3
3. Hipótesis.....	13
4. Objetivos.....	14
5. Materiales y métodos.....	15
5.1. Composición de los sorgos evaluados	
5.2. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente	
5.2.1. Animales y alojamiento	
5.2.2. Tratamientos y dietas	
5.2.3. Colecta ileal	
5.2.4. Determinación de los coeficientes de digestibilidad ileal aparente	
5.3. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática	
5.3.1. Animales y alojamiento	
5.3.2. Tratamientos y dietas	
5.3.3. Colecta de muestras	
5.4. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía	
5.4.1. Animales y alojamiento	
5.4.2. Tratamientos y dietas	
5.4.3. Colecta de heces y orina	
5.5. Análisis de laboratorio	

5.6 Análisis estadístico	
6. Resultados.....	29
6.1. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente	
6.2. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática	
6.3. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía	
7. Discusión.....	38
7.1. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente	
7.2. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática	
7.3. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía	
8. Conclusiones.....	47
9. Referencias.....	48

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Características de los sorgos.....	18.
<b>Cuadro 2.</b> Composición química de los sorgos.....	19
<b>Cuadro 3.</b> Composición de las dietas de los tratamientos. Experimento 1 y 2.....	20
<b>Cuadro 4.</b> Composición de las dietas experimentales del balance de nitrógeno y energía.....	25
<b>Cuadro 5.</b> Coeficientes de digestibilidad ileal aparente.....	30
<b>Cuadro 6.</b> Concentraciones plasmáticas de glucosa y urea.....	32
<b>Cuadro 7.</b> Medias generales de tratamiento para glucosa y urea.....	33
<b>Cuadro 8.</b> Balance de nitrógeno y energía.....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Concentraciones plasmáticas postprandiales de glucosa. Efecto de los taninos (a) y (b) efecto de las kafirinas. Medias de mínimos cuadrados,  $\pm$ EEM.....31
- Figura 2.** Concentraciones plasmáticas postprandiales de urea. Efecto de los taninos (c) y (d) efecto de las kafirinas. Medias de mínimos cuadrados,  $\pm$ EEM.....32

## 1. INTRODUCCIÓN

El sorgo (*Sorghum bicolor*) es un grano básico que ocupa el quinto lugar en la producción de cereales a nivel mundial, después del trigo, arroz, maíz y cebada (Wong *et al.*, 2009) y se estima que la producción mundial del sorgo incrementa 7.6% en el 2015 respecto a la producción del 2014 (USDA, 2015). El sorgo se emplea en la alimentación animal, en la producción de forrajes, en la elaboración de bebidas alcohólicas, en la fabricación de biocombustibles y en algunas partes de África, Asia, India, Pakistán y China constituye gran parte de la alimentación humana (Awika y Rooney, 2004; Taylor *et al.*, 2006).

En México predominan los climas áridos y semiáridos en más de la mitad de la superficie nacional y la mayor parte de la agricultura se practica en tierras de temporal. Estos factores han favorecido que México sea uno de los principales países productores de sorgo en el mundo (7.8 millones de toneladas) (USDA, 2015), ya que bajo condiciones de escasez de agua el rendimiento productivo del sorgo es mayor al del maíz (Selle *et al.*, 2010). El 28% del sorgo que se cultiva en el país se hace bajo la modalidad de riego, de la cual se obtiene el 49% del volumen generado (SIAP, 2015). A nivel nacional el principal productor de grano de sorgo es el estado de Tamaulipas, seguido de Guanajuato, Sinaloa y Michoacán, estas zonas aportan más del 78% de la producción total del país (SIAP, 2015). El 92% del grano de sorgo producido en el país es utilizado en la alimentación de aves, cerdos y rumiantes, donde el sorgo representa el 68% de los cereales usados en la formulación de raciones. El sorgo es incluido en la dieta principalmente como fuente de energía, ya que está constituido por 70-80% de almidón (Liu *et al.*, 2013b). Sin embargo, la inclusión de sorgo en la dieta se ha asociado con un menor desempeño productivo en aves y cerdos en comparación con otros cereales como el maíz.

Los taninos y las kafirinas son factores que disminuyen la eficiencia en la utilización de los nutrientes debido a que afectan la digestibilidad del almidón y de la proteína del sorgo (Selle *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013b) y disminuyen el valor nutricional del grano, el cual además de su aporte energético, puede proveer un tercio del requerimiento de los aminoácidos debido al alto nivel de inclusión en la dieta (60-80%) (Black *et al.*, 2005; Doti *et al.*, 2014).

La digestibilidad de los nutrientes de la dieta modifica el perfil de glucosa sanguíneo y a su vez la retención de nitrógeno. Se ha observado que las dietas con menor digestibilidad se asocian a índices glicémicos bajos y a mayor excreción urinaria y fecal de nitrógeno (Regmi *et al.*, 2010; Drew *et al.*, 2012; Doti *et al.*, 2014), lo que puede deberse a que la eficiencia con la que la energía es utilizada para el metabolismo de los tejidos depende de la sincronía en la disponibilidad de energía, aminoácidos y otros componentes esenciales; y los aminoácidos del sorgo son en gran parte absorbidos y catabolizados antes de que la energía esté disponible para la síntesis de proteína (Black *et al.*, 2005). Aunado a esto, la respuesta glicémica puede afectar la ingesta de alimento, la eficiencia alimenticia y la calidad de la canal (Regmi *et al.*, 2010; Doti *et al.*, 2014).

No obstante, aún no se ha podido determinar cómo interactúan los factores que causan la baja digestibilidad del sorgo (Grootboom *et al.*, 2014). Por lo que se llevó a cabo el presente trabajo para evaluar la influencia de las kafirinas, los taninos y el almidón presentes en el sorgo en la digestibilidad y la disponibilidad de los nutrientes.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El desempeño productivo de aves y cerdos alimentados con dietas a base de sorgo es relativamente menor a los alimentados con dietas a base de maíz y se considera que tiene el 95% del valor alimenticio en comparación con el maíz (Healy *et al.*, 1994; Mesa-Stonestreet *et al.*, 2010; Selle *et al.*, 2010). Cromwell *et al.* (1985), citado por Benz *et al.* (2011), mencionan que los animales que consumían sorgo tenían ganancia diaria de peso y conversión alimenticia 3% menores que los que cerdos que consumían maíz. Por otra parte, en estudios más recientes se ha observado un mejor desempeño productivo y una menor grasa dorsal en los cerdos de finalización que consumen sorgo que los alimentados con maíz (Shelton *et al.*, 2004; Benz *et al.*, 2011). Las mejores en estos estudios se atribuyen a un mayor consumo de alimento provocado por la utilización de sorgos bajos en taninos. Sin embargo, además de los taninos otros factores endógenos y exógenos afectan la utilización de los nutrientes del sorgo (Duodu *et al.*, 2003; Selle *et al.*, 2010). La concentración de las kafirinas, almidón, taninos y fitatos del sorgo son los principales factores que interfieren en la utilización digestiva en mayor o menor grado de acuerdo al estado fisiológico del cerdo.

### **SORGO**

El sorgo (*S. bicolor*) es un cultivo originario de África (Bhattacharya *et al.*, 2011). Es cultivado principalmente como un cultivo de temporal en regiones semiáridas de África, Asia, EUA y América Latina (Kole, 2007). El grano de sorgo es el grano más consumido en África, Sur de Asia y Centro América y un alimento animal importante para EUA, México, Australia y Sudamérica (Kole, 2007; Bhattacharya *et al.*, 2011).

El sorgo es considerado uno de los cinco cereales más importantes a nivel mundial (Wong *et al.*, 2009), debido a su potencial para adaptarse a un amplio rango de condiciones ambientales; es tolerante al agua y puede crecer en áreas con alta precipitación. Sin embargo, es un cultivo principalmente de regiones

semiáridas con una precipitación de 400 a 600 mm, que es demasiado seco para los cultivos de maíz (Kole, 2007), una humedad relativa de 15-50%, latitud entre 40°N y 40°S de cada lado del ecuador, una altitud de 1600 a 2500 msnm para México y temperatura de 12- 37 °C, con una óptima para crecimiento y fotosíntesis de 32-34°C (Rao y Kumar, 2012).

La adaptabilidad del sorgo a climas áridos se debe a su alta eficiencia en el uso de agua, su bajo requerimiento de nutrientes (Bhattacharya *et al.*, 2011) y su resistencia al estrés biótico (enfermedades, insectos, malezas) (Kole, 2007; Grootboom *et al.*, 2014). Posee características morfológicas y fisiológicas que contribuyen a esta adaptabilidad a climas áridos, que incluyen un extenso sistema de raíces, floración cerosa en las hojas que reduce las pérdidas de agua y capacidad de detener el crecimiento en periodos de sequía, alta eficiencia fotosintética para convertir la energía solar a través de una vía fotosintética C<sub>4</sub> que soporta condiciones extremas de temperatura, variaciones en la intensidad de la luz, baja disponibilidad de agua y alta eficiencia en la fijación de CO<sub>2</sub> comparado con los cereales con vías fotosintéticas C<sub>3</sub> (Bhattacharya *et al.*, 2011).

El grano del sorgo es generalmente de forma esférica, está constituido de tres distintas estructuras anatómicas: pericarpio, endospermo y germen. Algunas variedades tienen una cuarta estructura llamada testa, localizada entre el pericarpio y el endospermo. El pericarpio y la testa constituyen la cobertura externa del grano y están compuestas por polisacáridos no amiláceos, componentes fenólicos y carotenoides. El endospermo es el tejido de almacenamiento y es rico en almidón, proteínas, vitaminas del complejo B y minerales. Y el germen o embrión está compuesto de lípidos, vitaminas liposolubles, vitaminas del complejo B y minerales (De MoraisCardoso y Pinheiro, 2015)

## **Composición química del sorgo**

El sorgo se caracteriza por tener una gran variación en su composición química y por consecuencia en su calidad nutritiva. La variación en la composición química está influenciada por factores genéticos y ambientales (clima, tipo de suelo y fertilización). En promedio el endospermo constituye alrededor del 84% de la composición del grano de sorgo.

### **PROTEINA**

La proteína es el segundo mayor componente del grano del sorgo después del almidón (Stefoska-Needham *et al.*, 2015). La proteína del sorgo se encuentra en la matriz del endospermo y como cuerpos proteicos dentro del endospermo, los cuales rodean los gránulos de almidón (Duodu *et al.*, 2003; Salinas *et al.*, 2006). El contenido de proteína cruda del grano de sorgo es altamente variable (5.2-12.9%) (Ramírez *et al.*, 2005; Salinas *et al.*, 2006) y el incremento de proteína en el endospermo puede ser una adaptación para soportar la germinación en suelos con bajos niveles de nitrógeno (Bhattacharya *et al.*, 2011).

La proteína del sorgo está constituida por kafirinas, gluteínas, albuminas y globulinas (Selle *et al.*, 2010). Las kafirinas y gluteínas son las proteínas más abundantes en el endospermo del sorgo y representan del 50-80% de la proteína del sorgo (Selle *et al.*, 2010). Las kafirinas son solubles en etanol 70% y se conocen de manera genérica como prolaminas debido a su alto contenido de prolina y aminas de nitrógeno derivado de glutamina (Belton *et al.*, 2006)

Las kafirinas se pueden clasificar en cuatro clases;  $\alpha$ -kafirinas (66-84% de la fracción total),  $\beta$ -kafirinas (7-13%),  $\gamma$ -kafirinas (9-21%) y  $\delta$ -kafirinas (Belton *et al.*, 2006; Wong *et al.*, 2009). La clasificación se basa en su solubilidad, movilidad electroforética, composición y secuencia de aminoácidos, peso molecular y reacciones inmuno-químicas (Belton *et al.*, 2006; Wong *et al.*, 2009). Las  $\beta$ - y  $\gamma$ -kafirinas se localizan a la periferia de los cuerpos proteicos, mientras que las  $\alpha$  y

las  $\delta$ -kafirinas se encuentran encapsuladas en la región interior (Grootboom *et al.*, 2014). Las  $\alpha$ -kafirinas son las más abundantes y más digestibles cuando son aisladas, sin embargo son las últimas en ser digeridas debido a la formación de uniones disulfuro intramoleculares entre las kafirinas de la periferia y las que se encuentran en el interior de los cuerpos proteicos lo que limita el acceso de las enzimas hidrolíticas y por lo tanto disminuye la digestibilidad de la proteína del sorgo y en consecuencia la del almidón (Belton *et al.*, 2006),

Las composición química de cada sub-clase de kafirina es diferente por lo que la proporción entre cada una de estas va a determinar la composición de aminoácidos, la digestibilidad y por lo tanto la calidad de la proteína del sorgo (Wong *et al.*, 2009). Las  $\beta$ - y  $\gamma$ -kafirinas son ricas en cisteína lo que facilita la formación de uniones disulfuro. Y en general, las kafirinas del sorgo son ricas en ácido glutámico y aminoácidos no polares (prolina, leucina y alanina) y deficientes en aminoácidos esenciales como lisina, metionina, treonina y triptófano (Wong *et al.*, 2009).

Algunos autores mencionan que el nivel proteína cruda del sorgo se encuentra correlacionada positivamente al contenido de kafirinas y aminoácidos ramificados y negativamente al contenido de lisina y arginina (Selle *et al.*, 2010). Además, se ha observado que el contenido de kafirinas se correlaciona negativamente con la energía metabolizable, lo que sugiere que altas concentraciones de kafirinas impiden la utilización de la energía debido a una menor capacidad de gelatinización de los gránulos de almidón al ser más estables y tener menor probabilidad de perder su estructura original, además de ser granos más duros lo que dificulta separar el almidón, incluso cuando es molido (Salinas *et al.*, 2006).

Mariscal-Landín *et al.* (2010) evaluaron diferentes niveles de inclusión de sorgo en la dieta de cerdos destetados y en crecimiento y observaron una disminución lineal en los CDIA de la proteína cruda y aminoácidos conforme la cantidad del sorgo aumentaba, lo cual atribuyeron a un aumento en la secreción endógena y a la

presencia de kafirinas. Ya que se ha observado que la supresión de genes ( $\gamma$ -Kaf 1 y  $\gamma$ -Kaf 2) que codifican  $\gamma$ -kafirinas modifican la estructura de los cuerpos proteicos del sorgo y estos presentan irregularidades e invaginaciones que aumentan la digestibilidad de la proteína probablemente debido a un incremento en la superficie de los cuerpos proteicos que favorece la actividad de las enzimas proteolíticas, y a la inhibición de entrecruzamientos disulfuro entre los polipéptidos de la superficie y entre estos con los de la matriz interna (Grootboom *et al.*, 2014).

Las kafirinas tienen una conformación de hélice alfa pero cuando son calentadas cambian su estructura secundaria a una conformación de láminas  $\beta$  provocada por un aumento en la formación de puentes disulfuro, aumentando su resistencia a la hidrólisis, lo que disminuye adicionalmente la digestión del almidón (Belton *et al.*, 2006; Grootboom *et al.*, 2014). Sin embargo, cuando el sorgo es calentado sin agua, por ejemplo expansión (popping) o extrusión, la digestibilidad de la proteína no se ve afectada, lo que puede deberse a que el agua actúa como medio para que las proteínas puedan interactuar (Belton *et al.*, 2006).

## **ALMIDON**

El almidón es el componente más abundante del grano de sorgo. Posee distintas capas vítreas con gránulos de almidón poligonales integrados a una matriz proteica con cuerpos de proteína, y una capa harinosa con grandes gránulos de almidón ovoides y menor cantidad de proteína (Bhattacharya *et al.*, 2011). El almidón se acumula en gránulos dentro del endospermo, los cuales consisten en capas semi-cristalinas y amorfas (Svihus *et al.*, 2005).

El almidón del sorgo está compuesto principalmente por amilopectina (~70%) y amilosa (~30%). La amilopectina consiste en cadenas lineales de glucosa con enlaces  $\alpha$  1-4 y ramificaciones con enlaces  $\alpha$  1-6, mientras que la amilosa son cadenas lineales de glucosa con muy pocas ramificaciones (Svihus *et al.*, 2005). Los gránulos de almidón en el sorgo se encuentran envueltos por una matriz

proteica de kafirinas que actúan como una barrera físico-química que limita el acceso de la amilasa y disminuye su disponibilidad (Duodu *et al.*, 2003; Wong *et al.*, 2009). Otros factores como la proporción entre amilosa: amilopectina, la longitud de la cadena y el grado de ramificación de la amilopectina, el tamaño de los gránulos del almidón y su relación con las proteínas, lípidos y minerales determinan la velocidad de digestibilidad del almidón del sorgo (Wong *et al.*, 2009; Wolter *et al.*, 2013; Doti *et al.*, 2014).

Se ha sugerido que la estructura ramificada de la amilopectina le confiere una configuración más abierta lo que facilita el acceso de las enzimas e incrementa la digestibilidad de la amilopectina haciéndola más digestible que la amilosa (Mkandawire *et al.*, 2013). Camp y Southern (2003) evaluaron dietas a base de maíz los cuales contenían diferentes relaciones de amilopectina:amilosa y observaron una mejora en el desempeño de cerdos de finalización alimentados con altos niveles de amilopectina, lo cual atribuyeron a una mayor disponibilidad de glucosa. Contrario a esto, en otro estudio se compararon sorgos altos y bajos en amilopectina y no se observaron efectos en el crecimiento o la calidad de la canal (Shelton *et al.*, 2004).

Por otra parte, factores como los taninos disminuyen la digestibilidad del almidón al interactuar con la amilasa y reducir su actividad (Mkandawire *et al.*, 2013). Además, los taninos interaccionan con el almidón, especialmente la amilosa, lo que contribuye a la formación de almidón resistente (Mkandawire *et al.*, 2013). Por un lado esto puede tener efectos benéficos ya que el almidón resistente puede actuar como un prebiótico al estimular la proliferación de bacterias benéficas en el tracto gastrointestinal y reducir los niveles de glucosa plasmática (Regmi *et al.*, 2011). Sin embargo, la velocidad de digestión del almidón y la disponibilidad de glucosa plasmática se encuentra relacionado con el incremento en el nivel de insulina el cual estimula el uso de los aminoácidos en los tejidos e inhibe la degradación proteica muscular (Wolter *et al.*, 2013; Doti *et al.*, 2014), por lo que un

incremento en la tasa de digestión del nitrógeno tiende a mejorar la conversión alimenticia y esta mejora es más pronunciada cuando el almidón es rápidamente digerido.

La deposición de proteína muscular requiere de aminoácidos y glucosa. Black *et al.* (2005) sugieren que una de las razones en la inferioridad en la calidad nutritiva del sorgo es la asincronía en la digestión del almidón y la proteína, provocada por la estructura dentro del endospermo del grano y a los componentes que interfieren en la digestión, como los taninos. Además, el intestino utiliza parte de los aminoácidos digeridos como fuente de energía por lo que proporcionalmente se absorbe más glucosa que aminoácidos. (Liu *et al.*, 2013a) mencionan que la eficiencia en la conversión alimenticia puede ser atribuida a la relación entre la glucosa y los aminoácidos absorbidos más que los coeficientes de digestibilidad ileal. En la práctica los animales que consumen el alimento de forma restringida podrían ser más afectados que los que consumen a libre acceso, sin embargo, estos animales no consumen de forma continua.

## **TANINOS**

Los taninos son metabolitos secundarios sintetizados por el grano de sorgo que se concentran en la testa y el pericarpio (Jansman, 1993). Un pericarpio grueso se ha asociado a un incremento en los niveles de componentes polifenólicos o taninos (Bhattacharya *et al.*, 2011). Dentro de los efectos biológicos de los taninos está la prevención contra la depredación por aves, infecciones fungales y la deterioración del grano pre-cosecha (Grootboom *et al.*, 2014)

El contenido, tipo y la distribución de los taninos varía en el sorgo, por lo que los sorgos se pueden clasificar como tipo (I): no contiene niveles significantes ( $<0.28 \text{ g Kg}^{-1}$ ) y no tienen la testa pigmentada; tipo (II): contienen taninos condensados

(<4.48 g Kg<sup>-1</sup>) y tienen la testa pigmentada y tipo (III): contienen taninos condensados en la testa y el pericarpio (11.95 g Kg<sup>-1</sup>) (Selle *et al.*, 2010).

En las plantas existen dos clases de taninos biosintéticamente distintas: taninos hidrolizables (ésteres de ácido gálico o ácido elágico y una molécula de hexosa en la parte central de su estructura); y los taninos condensados (proantocianidinas o procianidinas) que son catequinas, estos últimos son los únicos encontrados en los sorgos (Grootboom *et al.*, 2014). Estos compuestos son ricos en grupos hidroxifenólicos por lo que, bajo condiciones óptimas (peso molecular, estructura terciaria, punto isoeléctrico, y compatibilidad con los sitios de enlace), son altamente propensos a unirse y precipitar proteínas mayores a 12 veces su peso a través de puentes de hidrógeno, uniones covalentes, interacciones hidrofóbicas y electrostáticas (Duodu *et al.*, 2003). El grano de sorgo contiene un promedio de 10% de proteína. Esto implica que los granos altos en taninos (≥2%) contienen suficientes taninos para unirse a toda la proteína dietaria proveniente del grano (Grootboom *et al.*, 2014).

Los taninos reducen el valor nutricional de la proteína y energía del sorgo a través de diferentes mecanismos:

- Acción inhibitoria: Se unen directamente a las enzimas digestivas inhibiendo su actividad enzimática (Jansman, 1993). A nivel del duodeno y yeyuno se unen a la tripsina, amilasa y lipasa y a nivel de íleon a la tripsina y amilasa (Wong *et al.*, 2009). Además, inhiben la absorción de los aminoácidos al unirse a los transportadores de aminoácidos del borde de cepillo del intestino (King *et al.*, 2000).
- Interacción con nutrientes: los taninos forman complejos insolubles con proteínas, carbohidratos y minerales (calcio, fósforo y magnesio) que resisten a la digestión enzimática y reducen la digestibilidad de la proteína más del 50% (Duodu *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2007). Los taninos se unen principalmente a las proteínas con alto peso molecular, alto contenido de

prolina y que no contienen uniones con carbohidratos, como las kafirinas, lo que disminuye aún más la digestibilidad de las kafirinas del sorgo y a su vez afecta la digestibilidad ileal del almidón al actuar como una barrera que evita la gelatinización del almidón (Wong *et al.*, 2009; Grootboom *et al.*, 2014).

- Efecto de los taninos en el desarrollo de aves y cerdos: los taninos tienen un efecto astringente que reduce el consumo debido a la baja palatabilidad lo cual disminuye el desempeño productivo del animal (Charlton *et al.*, 2002). Además, estimula la síntesis y secreción salival de proteínas ricas en prolina (PRP) las cuales tienen afinidad con los taninos y a nivel ileal reducen la digestibilidad e incrementan la secreción de proteína endógena (Charlton *et al.*, 2002; Selle *et al.*, 2010). También se ha reportado atrofia y acortamiento de las vellosidades ileales y degeneración de los hepatocitos (Nyamambi *et al.*, 2007). En rumiantes, el efecto negativo de los taninos es reducido por acción de los microorganismos del tracto gastrointestinal que desintoxican a los taninos, además se ha descrito que pueden tener efectos benéficos al disminuir la velocidad de degradación microbiana de la proteína e incrementar la absorción de aminoácidos (Acamovic y Brooker, 2005).

Se ha demostrado que la digestibilidad y la eficiencia alimenticia de las aves y cerdos alimentados con sorgos con taninos es 5-10% menor que los alimentados con sorgo que no contienen taninos (Mariscal-Landín *et al.*, 2004; Selle *et al.*, 2010). Ravindran *et al.* (2006) sugieren que un incremento de 0.1% en el contenido de taninos inducen una disminución de 10% en la digestibilidad de los aminoácidos.

En estudios previos se ha observado que los sorgos altos en taninos tienen un valor nutricional del 90-95% en relación a los sorgos bajos en taninos. Mariscal-Landín *et al.* (2004) evaluaron sorgos con diferentes niveles de taninos y

observaron mayores CDIA de prolina en sorgos bajos en taninos y una reducción en los CDIA de glicina y prolina provocada por la estimulación de la proteína rica en prolina (PRP) en los sorgos altos en taninos, además de la estimulación de la secreción enzimática. En estudios de balance de nitrógeno se ha demostrado un incremento en el nitrógeno fecal relacionado con la formación de complejos indigestibles entre los taninos y la proteína de la dieta o microbiana y en algunos casos el nitrógeno fecal es mayor que el nitrógeno disponible en el alimento lo que sugiere un incremento compensatorio inducido por los taninos (Acamovic y Brooker, 2005). Esto resulta metabólicamente costoso en términos de energía asociada con la síntesis de los componentes que son excretados (Acamovic y Brooker, 2005).

### **3. HIPÓTESIS**

Los taninos y kafirinas afectan la digestibilidad ileal de los nutrientes del sorgo, lo que va a modificar el perfil plasmático de urea y glucosa y la retención de nitrógeno y energía.

#### **4. OBJETIVOS**

- Determinar el efecto de los taninos y kafirinas del sorgo sobre los coeficientes de digestibilidad ileal de cerdos en crecimiento.
- Determinar el efecto de los taninos y kafirinas del sorgo sobre los niveles plasmáticos glicémica y urémica de cerdos en crecimiento.
- Determinar el efecto de los taninos y kafirinas del sorgo sobre la retención de nitrógeno y digestibilidad de la energía de cerdos en crecimiento.

## **5. MATERIAL Y MÉTODOS**

El estudio se llevó a cabo en la unidad metabólica del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal del INIFAP, ubicado en el Km 1 carretera a Colón, Querétaro, México. El presente trabajo fue revisado y aprobado por el Subcomité Institucional para el Cuidado y Uso de Animales Experimentales (SICUAE) del Posgrado de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Salud y la Producción Animal, UNAM, que sigue los lineamientos establecidos por la Norma Oficial Mexicana donde se contemplan las especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio (NOM-062-ZOO-1999, 2001).

### **5.1. Características y composición de los sorgos evaluados**

Se utilizaron dos variedades de sorgo, uno bajo (Pioneer 81G93 DuPont<sup>®</sup>) y uno alto (Pioneer 81G67 DuPont<sup>®</sup>) en taninos. Cada una de estas variedades se sometieron a dos régimen de fertilización diferentes, los cuales consistieron en: (1) a la siembra 300 kg/ha de una preparación comercial de nitrógeno, fosforo y potasio y (2) a la siembra 300 kg/ ha de nitrógeno, fosforo y potasio, y al día 30 300 kg/ha de sulfato de amonio y urea 50:50, con el objetivo de obtener en cada parcela sorgos con diferentes características: Sorgo bajo en taninos y bajo en kafirinas (SBT-BK), Sorgo bajo en taninos y alto en kafirinas (SBT-AK), Sorgo alto en taninos y bajo en kafirinas (SAT-BK) y Sorgo alto en taninos y alto en kafirinas (SAT-AK). En el Cuadro 1 se presentan las características de los sorgos.

Los sorgos obtenidos se analizaron mediante los métodos estándares de la AOAC, 2000 para determinar su composición química, la cual se presenta en el Cuadro 2.

## 5.2. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente

### 5.2.1. Animales y alojamiento

Se utilizaron cuatro cerdos machos castrados de la cruce genética GP8 x Fertilis 25 PIC<sup>®</sup> con un peso inicial de  $25 \pm 0.56$  kg, a los cuales se les colocó una cánula en el íleon distal mediante la metodología descrita por Reis de Souza *et al.* (2000). Los animales se alojaron individualmente en jaulas metabólicas provistas de un comedero y un bebedero individual ubicadas en un cuarto con ambiente controlado. Después de la cirugía los animales tuvieron un periodo de recuperación de 14 días, durante el cual se ofreció el alimento de forma paulatina, iniciando con 100 gramos al día siguiente a la cirugía y aumentando 100 gramos por día con la finalidad de evitar presión mecánica y evitar daño al intestino, además de favorecer la cicatrización completa del tejido. La fase experimental inició cuando los cerdos alcanzaron su consumo previo a la cirugía.

### 5.2.2. Tratamientos y dietas

Los animales se distribuyeron aleatoriamente en diseño en cuadro latino 4x4 para evaluar cuatro tratamientos, los cuales se describen en el Cuadro 3. Las dietas de cada tratamiento se formularon con los sorgos del Cuadro 2 y se adicionaron con vitaminas y minerales para satisfacer o exceder las necesidades de los animales. Se añadió sacarosa para mejorar el sabor del sorgo y óxido de titanio como marcador de la digestibilidad ( $3 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Los animales tuvieron agua a libre acceso y la cantidad de alimento recibido excedió 2.5 veces su requerimiento de energía digestible de mantenimiento ( $460 \text{ kJ/kg BW}^{0.75}$ ), (INRA, 1984), esta ración se dividió en dos porciones durante el día.

### 5.2.3. Colecta ileal

El periodo experimental consistió de cinco días de adaptación al tratamiento seguido de dos días de colecta ileal durante 12 horas consecutivas (8:00 a 20:00 horas). El contenido intestinal se colectó en bolsas de plástico fijadas con una liga a la cánula. Se añadió a la bolsa un acidificante (10 mL de solución de HCl 0.2N) para inhibir la actividad bacteriana. Las bolsas fueron removidas y cambiadas una vez llenas.

Las muestras se almacenaron a -20°C hasta su liofilización. Una vez liofilizadas, las muestras de digesta fueron molidas a través de una malla de 0.5 mm para el posterior análisis químico de materia seca, proteína, energía, óxido de titanio, aminoácidos, almidón, amilosa y amilopectina.

### 5.2.4. Determinación de los coeficientes de digestibilidad ileal aparente.

Los coeficientes de digestibilidad ileal aparente de la materia seca, proteína cruda, aminoácidos, energía y almidón de todos los tratamientos se calcularon empleando la siguiente ecuación (Mariscal-Landín y Reis de Souza, 2006):

$$\text{CDAI} = 1 - [(\text{ID} \times \text{AF}) / (\text{AD} \times \text{IF})]$$

Donde

CDAI = es el coeficiente de digestibilidad aparente ileal de un nutrimento en la dieta,

ID = es la concentración del indicador en la dieta ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  de MS),

AF = es la concentración del nutrimento en la digesta ileal ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  de MS),

AD = es la concentración del nutrimento en la dieta ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  de MS) y;

IF = es la concentración del indicador en la digesta ileal ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  de MS).

**Cuadro 1. Características de los sorgos**

	Pioneer	
	81G67	82G93
Descripción	Sorgo anti-pájaro, Sanidad foliar y de panoja, Estable y rendidor, Ideal para riego	Alto rendimiento, Excelente sanidad foliar, Buena respuesta a enfermedades de la panoja, Porte medio alto, Buena tolerancia a acame
Densidad de siembra	16-18 kg/ha	16-18 kg/ha
Fecha de siembra	01 Abril- 15 Juio	Riego: 01 Abril - 30 Mayo
Ciclo	Intermedio	Intermedio
Días a floración	70- 75 días	75- 80 días
Días a cosecha	160-165 días	165- 170 días
Altura de la planta	1.50- 1.60 m	1.65- 1.75 m
Tipo de panoja	Semi- abierta	Semi- compacta
Taninos	Alto	Bajo

**Cuadro 2. Composición química de los sorgos<sup>1</sup>**

	<b>BTBK</b>	<b>BTAK</b>	<b>ATBK</b>	<b>ATAK</b>
Kafirinas, %	42.5	51.1	45.0	57.0
Taninos, %	0.03	0.01	6.36	6.88
Proteína cruda	89.4	90.8	98.1	105.4
Energía Bruta, kcal	4191.8	4237.1	4385.5	4302.0
FDN	92.1	96.5	152.4	151.0
Extracto eteréo	32.0	44.3	39.4	35.1
Cenizas	14.9	18.8	20.7	20.8
Aminoácidos				
Arg	3.2	3.3	4.0	4.9
His	2.0	1.8	2.0	2.1
Ile	3.8	3.9	4.3	4.1
Leu	10.1	10.2	10.6	11.5
Lys	1.9	2.1	1.8	2.2
Met	2.0	1.3	1.3	1.3
Phe	3.6	3.7	4.7	4.9
Thr	2.3	3.1	3.1	2.7
Val	4.3	4.3	5.0	5.2
Ala	7.3	6.8	8.4	9.0
Asp	5.6	6.2	7.4	5.3
Cys	2.0	2.0	2.1	2.1
Glu	18.5	15.2	19.1	20.6
Gly	2.1	2.7	3.0	3.0
Pro	7.0	7.5	7.2	8.4
Ser	3.4	3.7	4.0	4.2
Tyr	2.7	2.4	2.7	3.2
Almidón	774.1	741.0	694.7	672.7
Amilosa	144.2	202.9	134.7	179.9
Amilopectina	629.9	538.1	560.0	492.8

<sup>1</sup>g kg<sup>-1</sup> de materia seca, con excepción de taninos y kafirinas (%)

**Cuadro 3. Composición de las dietas de los tratamientos (g· kg<sup>-1</sup>).****Experimento 1 y 2.**

	Tratamiento			
	BTBK	BTAK	ATBK	ATAK
Sorgo BT-BK	902.1			
Sorgo BT-AK		902.1		
Sorgo AT-BK			902.1	
Sorgo AT-AK				902.1
Sacarosa	50.0	50.0	50.0	50.0
Canola, Aceite	20.0	20.0	20.0	20.0
Sal yodada	5.0	5.0	5.0	5.0
Carbonato de calcio	8.0	8.0	8.0	8.0
OrtoFosfato	11.4	11.4	11.4	11.4
Premezcla de minerales <sup>1</sup>	1.0	1.0	1.0	1.0
Premezcla de vitaminas <sup>2</sup>	2.5	2.5	2.5	2.5

<sup>1</sup>Composición por kg de premezcla: Cobre 12,000ppm; Hierro 100,000ppm, Manganeso, 30,000ppm; Selenio, 250ppm; Zinc 120000ppm, Cloro 9.77%

<sup>2</sup>Composición por kg de premezcla: Vitamina A 6,563 IU, D 893 IU, E 33.5 IU, K 1,200 ppm, Riboflavina 3,600ppm mg, B12 18ppm, Colina 356,600ppm, Niacina 17,250ppm, Ác. pantoténico 13,700ppm, Tiamina 1,363ppm, Piridoxina 2,800ppm, Biotina 127ppm, Ácido. fólico 890ppm.

### **5.3. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática**

#### 5.3.1. Animales y alojamiento

Se utilizaron cuatro cerdos machos castrados GP8 PIC<sup>®</sup> x Fertilis 25 con un peso inicial de  $26 \pm 0.52$  Kg, los cuales se les colocó un catéter en la vena yugular según la metodología descrita por Soraci *et al.* (2010). El catéter se exteriorizó y se fijó al dorso del animal para facilitar el manejo. Los animales se alojaron individualmente en jaulas metabólicas provistas de un comedero y un bebedero individual ubicadas en un cuarto con ambiente controlado.

#### 5.3.2. Tratamientos y dietas

Los animales siguieron las restricciones de aleatorización de un diseño en cuadro latino 4x4 para evaluar cuatro tratamientos, los cuales se presentan en el Cuadro 3. Las dietas de cada tratamiento se formularon con los sorgos del Cuadro 2 como y se suplementaron con vitaminas y minerales. Se añadió sacarosa para mejorar la palatabilidad del sorgo. Los animales recibieron la misma cantidad de alimento (1 Kg/día), la cual se ajustó a este nivel para asegurar que los animales no rechazaran el alimento. Esta cantidad se dividió en porciones iguales por la mañana y por la tarde.

#### 5.3.3. Colecta de muestras

El periodo experimental consistió de cinco días de adaptación a la dieta seguido de un día de colecta de sangre. El día del muestreo después de recibir la porción de alimento matutina se colectaron 3 mL de sangre en tubos heparinizados de 5 mL a los siguientes tiempos: 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 y 360 minutos posteriores al consumo de alimento para la determinación de urea y glucosa plasmática. Todos los cerdos consumieron el alimento dentro de los primeros 30 minutos posteriores a que el alimento fue ofrecido.

Las muestras obtenidas se centrifugaron a 5,000 rpm durante 3 minutos a 4°C dentro de la primera hora después de su colección. Se obtuvo una alícuota de plasma en microtubos y se almacenó en congelación hasta su análisis.

## **5.4. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía**

### 5.4.1. Animales y alojamiento

Se utilizaron cinco cerdos machos castrados GP8 PIC<sup>®</sup> x Fertilis 25 con un peso inicial de 48.8± 0.44 kg de PV distribuidas aleatoriamente en un diseño cuadro latino 5x5. Los animales se alojaron individualmente en jaulas metabólicas ubicadas en un cuarto con ambiente controlado. Las jaulas cuentan con un comedero y un bebedero individual y en la parte superior una malla y una charola que permite recolectar las heces y filtrar la orina evitando que se contamine con heces o alimento.

### 5.4.2. Tratamientos y dietas

Se evaluaron cinco tratamientos los cuales consistieron en cuatro dietas a base de sorgo y una a base de maíz para el tratamiento control. Las dietas se presentan en el cuadro 4. Las dietas se formularon de acuerdo a los requerimientos para cerdos en finalización del National Research Council (NRC, 2012). Se incluyó una premezcla de vitaminas y minerales para cubrir los requerimientos. Las dietas se ofrecieron en forma de harina. El consumo de agua se limitó a 2.5 L por kilogramo de alimento consumido. Los animales consumieron el 4% de su PV (Adeola, 2001). La ración diaria se ofreció dividida en dos comidas iguales al día.

### 5.4.3. Colecta de heces y orina

El periodo experimental consistió de cinco días de adaptación a la dieta seguido de cuatro días de colecta total de heces y orina. Se adicionó óxido de cromo en el

alimento como marcador indigestible para determinar el inicio y el final de la recolección de las excretas.

Las heces fueron colectadas dos veces al día durante cuatro días, se pesaron y se almacenaron en bolsas de plástico en congelación a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Las heces de los cuatro días de colección se deshidrataron en una estufa de secado a  $55^{\circ}\text{C}$ , posteriormente se molieron (malla de 1mm) y mezclaron para obtener una submuestra para el análisis químico de materia seca, energía y nitrógeno.

La orina se colectó en recipientes de 20 L dos veces al día durante cuatro días. Se añadieron 40 mL de HCl 6N a los recipientes para acidificar la orina y prevenir la volatilización de nitrógeno urinario. Se obtuvo el volumen total de la orina diario, se filtró a través de gasas y fibra de vidrio y se almacenó en congelación el 10% del volumen total en botellas de plástico color ambar para su posterior análisis de nitrógeno y energía.

Diariamente se registró el consumo de alimento para obtener el consumo de materia seca (g/día), nitrógeno (g/día) y energía (Kcal/día), multiplicando el consumo de alimento por la concentración del nutriente en la dieta.

La estimación de la excreción de materia seca (g/día), nitrógeno (g/día) y energía (Kcal/día) en heces se estimó multiplicando la cantidad de heces producidas en base seca por la concentración de nutrimentos en las heces.

La estimación de la excreción de nitrógeno (g/día) y energía (Kcal/día) en orina se estimó multiplicando el total de orina producida por la concentración de nutrimentos en la orina.

La retención de nitrógeno (g/día) y energía digestible y metabolizable (Kcal/día) se calculó sustrayendo la cantidad de nutrimentos excretados en heces y orina de la cantidad de nutrimentos consumidos.

La digestibilidad fecal de la materia seca, nitrógeno y energía se estimó mediante la siguiente ecuación:

Digestibilidad del nutriente= (Concentración del nutriente en la dieta- concentración del nutriente en las excretas)/ Concentración del nutriente en la dieta.

**Cuadro 4. Composición de las dietas experimentales del balance de nitrógeno y energía<sup>1</sup>.**

	Tratamientos				
	Control	DBTBK	DBTAK	DATBK	DATAK
Maíz	634.2				
Sorgo BTBK		641.5			
Sorgo BTAK			641.5		
Sorgo ATBK				631.0	
Sorgo ATAK					631.0
Pasta de soya	317.3	311.2	311.2	321.5	321.5
Aceite de canola	24.6	23.2	23.2	23.5	23.5
Sal yodada	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Carbonato de calcio	6.1	6.3	6.3	6.2	6.2
Fosfato Cálcico	9.2	9.4	9.4	9.3	9.3
Premezcla de vitaminas <sup>2</sup>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
remezcla de minerales <sup>3</sup>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
<i>Análisis químico</i>					
Proteína cruda <sup>4</sup>	179.5	197.9	197.8	206.1	207.7
Energía bruta, Kcal	4706.0	4649.0	4677.0	4763.0	4753.0
Lis VID, %	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88

<sup>1</sup>Valores en g· Kg<sup>-1</sup>

<sup>2</sup>Composición por Kg de premezcla: Cobalto 600ppm, Cobre 12,000ppm, Hierro 100,000ppm, Manganeso 30,000ppm, Selenio 250ppm, Yodo 800ppm, Zinc 120000ppm.

<sup>3</sup>Composición por Kg: Vitamina A 6,563 IU, D 893 IU, E 33.5 IU, K 1,200 ppm, Riboflavina 3,600ppm mg, B12 18ppm, Colina 356,600ppm, Niacina 17,250ppm, Ác. pantoténico 13,700ppm, Tiamina 1,363ppm, Piridoxina 2,800ppm, Biotina 127ppm, Ácido fólico 890ppm.

<sup>4</sup>Se utilizaron niveles altos de proteína ya que no se utilizaron aminoácidos cristalinos.

## 5.5. Análisis de laboratorio

Las muestras de sorgo, contenido ileal y heces fueron molidas a través de una malla de 0.5 mm (Arthur H. Thomas Co., Philadelphia, PA) para su análisis. Las muestras de contenido ileal fueron previamente liofilizadas. El análisis de la composición química de las muestras se determinó conforme los métodos oficiales de análisis de la AOAC, (2000); materia seca (método 934.01 AOAC, 2000), proteína cruda (método 976.05 AOAC, 2000), extracto etéreo (método 954.02 AOAC, 2000), cenizas (método 942.05, AOAC 2000), fibra detergente neutro y fibra detergente ácida siguiendo la metodología de Van Soest *et al.* (1991). La energía bruta se calculó mediante una bomba calorimétrica adiabática (Parr 6400 Calorimeter). La concentración de Titanio según la técnica descrita por Myers *et al.* (2004). La concentración de almidón mediante polarimetría según (FEDNA, 2000). La relación de amilosa/amilopectina mediante el kit comercial Amylose/ Amylopectin (Megazyme International© Ireland Ltd., Wicklow, Ireland). La concentración de taninos condensados del sorgo se determinó con la metodología descrita por Price *et al.* (1978) y se expresó como mg de catequina equivalente/ 100 mg de MS y la concentración de kafirinas según Hamaker *et al.* (1995). En las muestras de orina se analizó nitrógeno y energía siguiendo los mismos métodos estándar descritos.

Para la determinación de aminoácidos las muestras de los sorgos y contenido ileal se procesaron mediante el método 994.12 de la AOAC, (2000), que consiste en la hidrólisis con ácido clorhídrico 6 molar a 110°C por 24 horas y la oxidación previa con ácido per fórmico para la determinación de metionina y cisteína y el análisis de aminoácidos se realizó por HPLC (Aligent 1100 HPLC) con derivación post columna (Pinnacle PCX), con reactivo de ninhidrina (Método 9: 1154150T).

En las muestras de plasma se determinó la concentración de glucosa y urea mediante espectrofotometría con un analizador clínico automático (Clinical chemistry analyzer Selectra Junior), utilizando el kit Gluc-PAP (Randox

laboratories) para glucosa y urea con el método cinético enzimático mediante el kit UREA (Randox laboratories).

## 5.6 Análisis estadístico

Los coeficientes de digestibilidad ileal aparente de los nutrientes se analizaron conforme a un diseño en cuadro latino 4x4 con un arreglo factorial 2x2 (dos niveles de taninos y dos niveles de kafirinas) con el procedimiento GLM de SAS 9.3. Modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + K_j + TK_{ij} + P_k + A_l + \epsilon_{ijkl}$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  = es la variable de respuesta de  $i$ -ésimo nivel de taninos en el  $j$ -ésimo nivel de kafirinas en el  $k$ -ésimo periodo del  $l$ -ésimo animal;  $\mu$  = es la media de la población;  $T_i$  = es el efecto del  $i$ -ésimo nivel de taninos;  $K_j$  = es el efecto del  $j$ -ésimo nivel de kafirinas;  $TK_{ij}$  = es el efecto de la interacción del  $i$ -ésimo nivel de taninos con el  $j$ -ésimo nivel de las kafirinas;  $P_k$  = es el efecto del  $k$ -ésimo periodo;  $A_l$  = es el efecto del  $l$ -ésimo animal;  $\epsilon_{ijkl}$  = es el efecto de error experimental asociado al  $i$ -ésimo nivel de taninos en el  $j$ -ésimo nivel de kafirinas en el  $k$ -ésimo periodo del  $l$ -ésimo animal.

Las diferencias entre medias se compararon mediante LSMeans.

Los datos de la concentración de urea y glucosa plasmática se analizaron mediante un análisis de varianza conforme a un diseño en cuadro latino 4x4 con un arreglo factorial 2x2 (dos niveles de taninos y dos niveles de kafirinas) y mediciones repetidas en el tiempo mediante el procedimiento MIXED de SAS 9.3. Modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijklm} = \mu + T_i + K_j + M_k + TK_{ij} + TM_{ik} + KM_{jk} + TKM_{ijk} + P_l + A_m + \epsilon_{ijklm}$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  = es la variable de respuesta de interés;  $\mu$  = es la media de la población;  $T_i$  = es el efecto de los taninos;  $K_j$  = es el efecto de las kafirinas;  $M_k$  = es el efecto del tiempo;  $TK_{ij}$  = es el efecto de la interacción del nivel de taninos con el nivel de las kafirinas;  $TM_{ik}$  = es el efecto de la interacción del nivel de taninos con el tiempo;  $KM_{jk}$  es el efecto de la interacción del nivel de kafirinas con el tiempo;  $TKM_{ijk}$  es la interacción entre los factores taninos, kafirinas y tiempo;  $P_l$  = es el efecto del periodo;  $A_m$  = es el efecto dado por el animal;  $\varepsilon_{ijklm}$  = es el error experimental.

Las diferencias entre medias se compararon mediante LSMeans.

Para el balance de nitrógeno y energía las variables de respuesta se analizaron según un diseño en cuadro latino 5 x 5 usando el procedimiento GLM de SAS 9.3. Las diferencias entre medias se compararon mediante LSMeans. Se realizaron contrastes ortogonales para determinar el efecto del grano utilizado (maíz vs sorgo), y efecto de los taninos y las kafirinas del sorgo.

Modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijk} = \mu + D_i + P_j + A_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = es la variable de respuesta de interés;  $\mu$  = es la media de la población;  $D_i$  = es el efecto del tratamiento;  $P_j$  = es el efecto del periodo;  $A_k$  = es el efecto dado por el animal;  $\varepsilon_{ijk}$  = es el error experimental.

$Y_{ijkl}$  = es la variable de respuesta de  $i$ -ésimo tratamiento en el  $j$ -ésimo periodo del  $k$ -ésimo animal;  $\mu$  = es la media de la población;  $D_i$  = es el efecto del  $i$ -ésimo tratamiento;  $P_j$  = es el efecto del  $j$ -ésimo periodo;  $A_k$  = es el efecto del  $k$ -ésimo animal;  $\varepsilon_{ijkl}$  = es el efecto de error experimental asociado al  $i$ -ésimo tratamiento en el  $j$ -ésimo periodo del  $k$ -ésimo animal.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente

En el Cuadro 5 se presentan los coeficientes de digestibilidad ileal aparente (CDIA) de los sorgos evaluados. Los CDIA de la materia seca, energía y proteína fueron más altos en los cerdos que consumieron dietas bajas en taninos ( $P \leq 0.05$ ) y no se observó influencia de las kafirinas o de la interacción taninos x kafirinas ( $P \geq 0.05$ ) en estas variables.

El nivel de taninos disminuyó los CDIA de los aminoácidos ácido aspártico, treonina, leucina, lisina, histidina, cisteína y metionina ( $P \leq 0.05$ ) y las kafirinas afectaron negativamente los CDIA del ácido glutámico y la histidina ( $P \leq 0.05$ ) y alanina, valina y ácido aspártico ( $P \leq 0.10$ ). Los CDIA de arginina, serina, isoleucina y fenilalanina no se afectaron por el nivel de los taninos, las kafirinas o la interacción de estos en la dieta ( $P \geq 0.05$ ). Los aminoácidos leucina, ácido glutámico metionina y fenilalanina tuvieron los CDIA más altos y arginina, treonina y cisteína fueron los menos digestibles. En general, en la dieta con sorgo BTBK se observaron los CDIA de aminoácidos más altos. Los CDIA para glicina y prolina fueron negativos en todas las dietas evaluadas.

Se observó una disminución en los CDIA de los aminoácidos ácido glutámico y lisina ( $P \leq 0.05$ ) y del ácido aspártico, valina, tirosina y metionina ( $P \leq 0.10$ ) debido a la interacción de las kafirinas con los taninos del sorgo.

Se observó una disminución en los CDIA del almidón ( $P \leq 0.05$ ) en las dietas altas en taninos relacionado con la disminución en la digestibilidad de la amilopectina ( $P = 0.006$ ). Sin embargo, no se observaron diferencias en los CDIA de la amilosa del almidón ( $P \geq 0.05$ ). Las kafirinas y su interacción con los taninos del sorgo no afectaron los CDIA del almidón o de alguno de sus componentes ( $P \geq 0.05$ ).

**Cuadro 5. Coeficientes de digestibilidad ileal aparente.**

	Taninos		Kafirinas		EEM	P		Taninos altos		Taninos bajos		EEM	P
	Alto	Bajo	Alto	Bajo		Tan	Kaf	Kafirinas		Kafirinas			Tan* Kaf
								alto	bajo	alto	bajo		
<b>MS</b>	0.68	0.75	0.72	0.71	0.0078	0.001	0.91	0.690	0.673	0.740	0.755	0.0111	0.19
<b>Energía</b>	0.68	0.74	0.71	0.71	0.0084	0.001	0.92	0.683	0.668	0.733	0.750	0.0119	0.22
<b>PC</b>	0.37	0.43	0.41	0.39	0.0167	0.046	0.39	0.388	0.352	0.438	0.430	0.0266	0.61
<b>Aminoácidos</b>													
<b>Arg</b>	0.30	0.36	0.36	0.30	0.0404	0.333	0.37	0.370	0.230	0.345	0.375	0.0645	0.23
<b>His</b>	0.57	0.69	0.6	0.66	0.0168	0.002	0.04	0.558	0.573	0.633	0.740	0.0238	0.10
<b>Ile</b>	0.60	0.64	0.59	0.65	0.0244	0.208	0.13	0.568	0.623	0.610	0.678	0.0346	0.86
<b>Leu</b>	0.75	0.79	0.76	0.77	0.0106	0.046	0.75	0.755	0.740	0.773	0.798	0.0149	0.23
<b>Lys</b>	0.44	0.68	0.59	0.54	0.0207	0.0002	0.12	0.510	0.378	0.665	0.693	0.0292	0.03
<b>Met</b>	0.63	0.76	0.67	0.72	0.0264	0.012	0.21	0.638	0.615	0.695	0.823	0.0373	0.09
<b>Phe</b>	0.67	0.67	0.65	0.69	0.0179	0.925	0.16	0.655	0.680	0.638	0.693	0.0253	0.57
<b>Thr</b>	0.39	0.54	0.44	0.50	0.0388	0.031	0.31	0.308	0.473	0.565	0.523	0.0548	0.11
<b>Val</b>	0.59	0.64	0.59	0.02	0.0176	0.105	0.09	0.570	0.608	0.605	0.668	0.0249	0.63
<b>Ala</b>	0.63	0.66	0.62	0.67	0.0145	0.269	0.07	0.633	0.630	0.610	0.703	0.0205	0.06
<b>Asp</b>	0.53	0.69	0.55	0.67	0.0424	0.040	0.08	0.405	0.658	0.690	0.685	0.0599	0.08
<b>Cys</b>	0.40	0.55	0.48	0.47	0.0307	0.011	0.85	0.423	0.368	0.533	0.570	0.0434	0.33
<b>Glu</b>	0.71	0.73	0.69	0.74	0.0142	0.387	0.05	0.708	0.708	0.678	0.775	0.0201	0.05
<b>Gly</b>	-0.42	-0.44	-0.42	-0.44	0.1250	0.876	0.95	0.333	-0.498	-0.515	-0.373	0.1769	0.42
<b>Pro</b>	-1.32	-1.22	-0.94	-1.60	0.3530	0.835	0.23	-0.665	-1.977	-1.205	-1.220	0.4990	0.24
<b>Ser</b>	0.50	0.57	0.52	0.55	0.0210	0.084	0.24	0.488	0.520	0.543	0.588	0.0296	0.84
<b>Tyr</b>	0.55	0.60	0.55	0.59	0.0206	0.122	0.25	0.558	0.533	0.548	0.648	0.0292	0.08
<b>Almidón</b>	0.80	0.86	0.83	0.84	0.0173	0.050	0.56	0.792	0.815	0.86	0.867	0.0245	0.77
<b>Amilosa</b>	0.70	0.61	0.73	0.58	0.0603	0.364	0.12	0.765	0.630	0.703	0.525	0.0853	0.81
<b>Amilopectina</b>	0.69	0.78	0.72	0.75	0.0160	0.006	0.27	0.680	0.693	0.760	0.803	0.0227	0.53

Medias de mínimos cuadrados. EEM= Error Estándar de la Media. Tan=taninos. Kaf=Kafirinas

## 6.2. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática

Las concentraciones plasmáticas de glucosa y urea plasmática postprandial expresadas en mg/dL se muestran en el Cuadro 6. El nivel de glucosa fue menor en las dietas altas en taninos al minuto 300 ( $P=0.02$ ), y se observó una tendencia a ser menor al tiempo 150 y 360 ( $P<0.08$ ). En la figura 1 se muestran los niveles de glucosa a través del tiempo. Se observa un pico en la glucosa plasmática en todos los tratamientos durante la primera hora postprandial seguido de una disminución precipitada. Al minuto 120 el nivel de glucosa comenzó a aumentar en las dietas bajas en taninos, probablemente asociado a la digestión del almidón del sorgo. Las concentraciones de glucosa plasmática en las dietas bajas en taninos tendieron a ser mayores que en las dietas altas en taninos. Al minuto 360 las dietas altas en taninos regresaron a su nivel basal, mientras que las dietas bajas en taninos aún se mantuvieron superiores a la concentración basal en ese tiempo. El nivel de kafirinas y la interacción de los taninos con las kafirinas no tuvieron un efecto significativo ( $P\geq 0.05$ ) en la concentración de glucosa postprandial.

Las concentraciones de urea plasmática a través del tiempo se muestran en la Figura 2. Las concentraciones basales de urea fueron superiores para las dietas bajas en taninos ( $P\leq 0.05$ ) y se mantuvieron constantes a través del tiempo. No se observó un efecto significativo del nivel de kafirinas, o de su interacción con el nivel de taninos ( $P\geq 0.05$ ) en la concentración de urea.

En el cuadro 7 se muestran las medias de las concentraciones de urea y glucosa plasmática durante las seis horas del muestreo. Los niveles de glucosa de la dieta BTBK fueron mayores ( $P\leq 0.05$ ) a la dieta ATBK. Los niveles de urea de la dieta BTAK superiores a los otros tratamientos ( $P\leq 0.001$ ).

**Cuadro 6. Concentraciones plasmáticas de Glucosa y Urea.**

Tiempo, min	Glucosa							Urea						
	Taninos		Kafirinas		EEM	<i>P</i>		Taninos		Kafirinas		EEM	<i>P</i>	
	Alto	Bajo	Alto	Bajo		Tan	Kaf	Alto	Bajo	Alto	Bajo		Tan	Kaf
0	80	83	83	79	7.7	0.69	0.27	10	18	16	12	2.5	0.002	0.09
15	86	86	87	85	7.4	0.95	0.81	10	19	16	13	2.5	0.001	0.20
30	100	100	98	102	7.1	0.99	0.70	11	18	16	13	2.4	0.003	0.19
45	95	101	97	99	7.1	0.34	0.70	11	19	16	13	2.5	0.002	0.24
60	88	88	84	92	7.1	0.93	0.37	11	18	16	13	2.4	0.003	0.28
90	89	90	89	89	7.1	0.87	0.96	10	17	15	12	2.4	0.005	0.30
120	88	89	87	91	7.1	0.92	0.58	10	18	15	12	2.4	0.002	0.23
150	88	100	92	96	7.1	0.08	0.57	10	18	15	13	2.5	0.001	0.31
180	89	93	89	93	7.1	0.60	0.62	9	18	14	12	2.4	0.001	0.45
240	86	97	93	91	7.1	0.14	0.74	9	16	13	12	2.5	0.013	0.58
300	84	100	98	87	7.1	0.02	0.08	9	16	13	12	2.4	0.002	0.66
360	82	96	93	85	7.1	0.06	0.17	8	16	13	12	2.4	0.002	0.69

Medias de mínimos cuadrados.

EEM= error estándar de la media.

Tan=taninos. Kaf= kafirinas

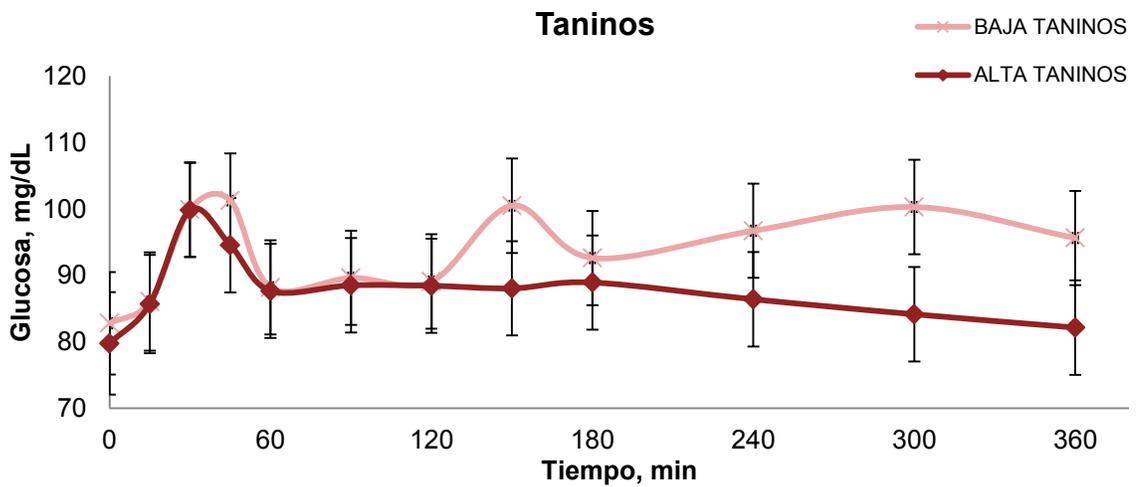
No se observó efecto de la interacción Tan\*Kaf ( $P \geq 0.05$ )

**Cuadro 7. Medias generales de tratamiento para Glucosa y Urea**

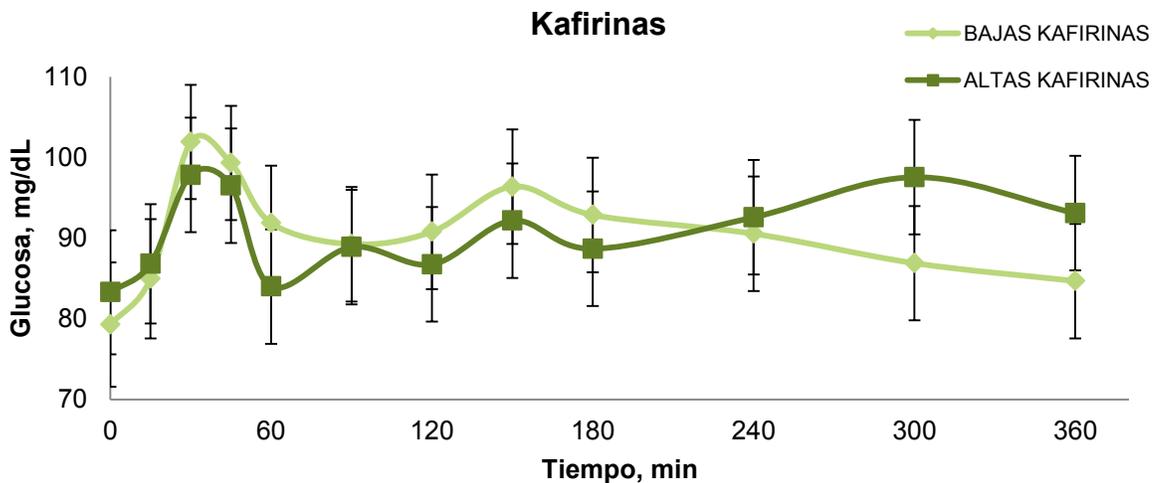
	Dietas				EEM	P
	SBT-BK	SBT-AK	SAT-BK	SAT-AK		
Glucosa, mg/dL	94.36b	90.98ab	85.22a	89.13ab	1.999	0.047
Urea, mg/dL	15.93b	18.79c	8.89a	10.79a	0.682	≤0.0001

Medias de Mínimos Cuadrados. EEM=Error estándar de la media

a)

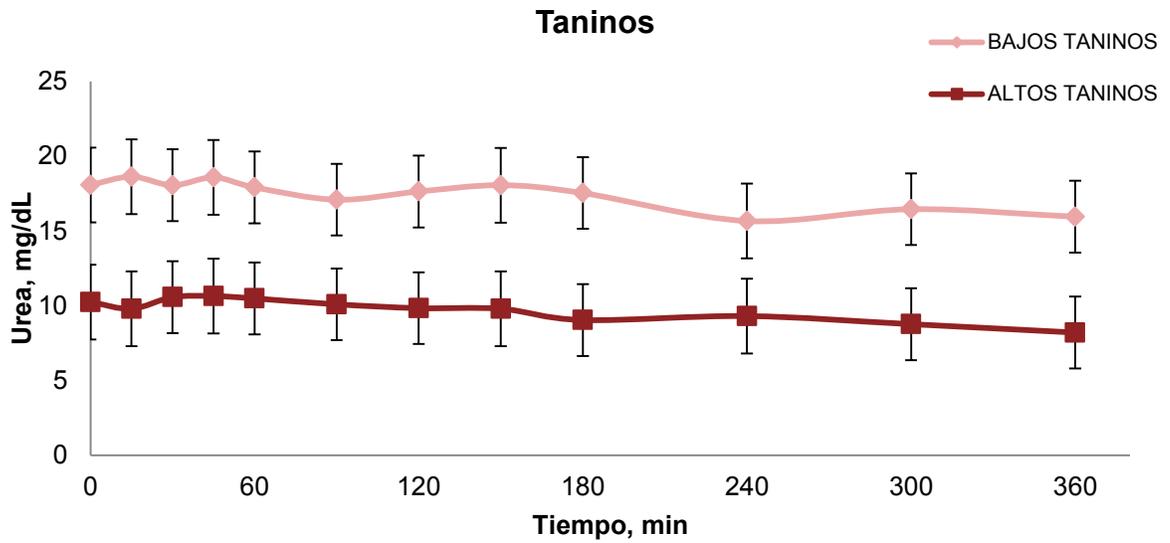


b)

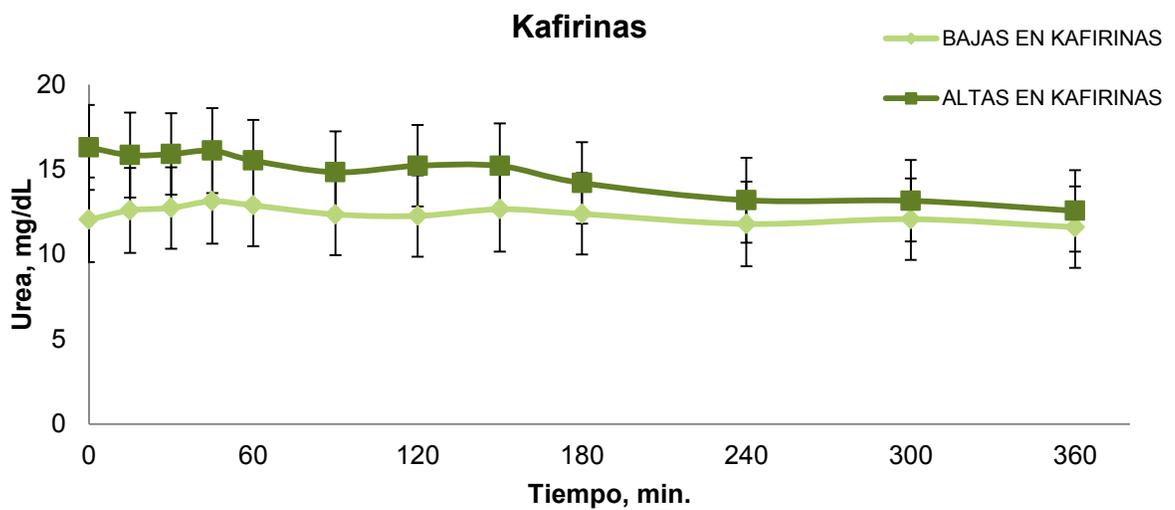


**Figura 1.** Concentraciones plasmáticas postprandiales de glucosa. Efecto de los taninos (a) y (b) efecto de las kafirinas. Medias de mínimos cuadrados, ±EEM

c)



d)



**Figura 2.** Concentraciones plasmáticas postprandiales de urea. Efecto de los taninos (c) y (d) efecto de las kafirinas. Medias de mínimos cuadrados,  $\pm$ EEM.

### 6.3. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía

En el Cuadro 8 se presentan los resultados del balance de nitrógeno y energía. Los cerdos alimentados con maíz tuvieron una menor excreción de materia seca en comparación con los alimentados con sorgo ( $P<0.0001$ ) y los cerdos que consumieron las dietas bajas en taninos tuvieron una menor excreción de materia seca en comparación con los alimentados con sorgos altos en taninos ( $P<0.0001$ ), por lo cual se observó mayor digestibilidad fecal aparente de la materia seca en los cerdos alimentados con maíz (87.8%), seguido de las dietas bajas en taninos (84.5 y 83.0%) y la menor digestibilidad fecal en las dietas altas en taninos (77.5 y 79.4%) ( $P<0.001$ ). El nivel de kafirinas no afectó la digestibilidad fecal de la materia seca ( $P=0.83$ ) y tampoco su interacción con el nivel de taninos ( $P=0.12$ ).

La digestibilidad fecal aparente del nitrógeno fue mayor en los cerdos alimentados con la dietas a base de maíz ( $P<0.001$ ) y fueron más eficientes en la retención del nitrógeno consumido ( $P<0.02$ ) que los alimentados con sorgo. Los cerdos de las dietas altas en taninos consumieron una mayor cantidad de nitrógeno ( $P<0.003$ ), por lo que excretaron una mayor ( $P<0.04$ ) cantidad de nitrógeno en heces ya que la digestibilidad fecal del nitrógeno de los sorgos fue similar al no haber efecto de los taninos o de las Kafirinas ( $P>0.10$ ). Se observó una tendencia ( $P<0.10$ ) en la interacción Taninos x Kafirinas en la cantidad de nitrógeno retenido en g/d y en el porcentaje de N retenido en función del consumido, y del absorbido. Siendo mayor la retención en los cerdos alimentados con el SBTBK que con el SBTAK, y se observó lo inverso en los cerdos alimentados con los sorgos altos en taninos, ya que la retención fue mayor en el SATAK que en el SATBK.

Los cerdos alimentados con la dieta a base de maíz consumieron más energía ( $P<0.0008$ ) que los alimentados con sorgo sin embargo excretaron la menor cantidad de energía ( $P<0.0001$ ) en las heces por lo que tuvieron la mayor digestibilidad fecal aparente de energía ( $P<0.0001$ ). En contraste, las dietas altas

en taninos consumieron una cantidad de energía similar a las dietas a base de maíz (12,230 vs 12200 Kcal) y excretaron en heces 80% más energía (17,777.8 vs 3,009.2 y 2,887.8 Kcal), por lo cual tuvieron una baja digestibilidad fecal de la energía, que fue menor a la observada en las dietas bajas en taninos ( $P < 0.0003$ ). No se observó un efecto significativo en la excreción de energía en la orina ( $P = 0.42$ ) entre los tratamientos por lo que el comportamiento en los valores de energía metabolizable fue similar al de digestibilidad; mayor para la dieta a base de maíz ( $P < 0.0001$ ) y menor para las dietas altas en taninos ( $P < 0.0003$ ). El nivel de kahirinas y la interacción taninos x kahirinas no afectó la energía digestible ni metabolizable ( $P > 0.10$ ).

**Cuadro 8. Balance de nitrógeno y energía**

	Dietas					EEM <sup>1</sup>	Contrastes			
	MAÍZ	DBT-BK	DBT-AK	DAT-BK	DAT-AK		C vs S	Tan	Kaf	Tan*Kaf
MS consumida, g/d	2606	2613	2585	2598	2602	7.20	0.46	0.9	0.12	0.05
MS excretada, g/d	314.8	406.7	431.2	572.4	524.6	20.25	0.0001	0.0001	0.57	0.10
Digestibilidad de MS <sup>2</sup> , %	87.8	84.5	83.0	77.5	79.4	0.99	0.0001	0.0002	0.83	0.12
N consumido, g/d	66.2	75.0	76.7	79.1	80.9	1.14	≤0.0001	0.003	0.15	0.95
N excretado, g/d	31.0	37.2	43.5	45.0	43.9	1.82	0.0001	0.04	0.18	0.06
N Heces, g/d	11.5	19.7	18.9	23.2	22.0	1.41	≤0.0001	0.04	0.48	0.91
N Orina, g/d	19.6	17.4	24.6	21.8	21.9	2.06	0.47	0.70	0.13	0.13
Digestibilidad del N <sup>2</sup> , %	82.6	73.8	75.1	70.5	72.0	2.08	0.001	0.15	0.50	0.95
N retenido, g/d	35.1	37.8	33.2	34.1	37.0	2.07	0.87	0.99	0.70	0.09
N retenido, % Consumo	53.4	50.4	43.3	42.8	45.8	2.68	0.02	0.35	0.46	0.08
N retenido, % Absorbido	64.8	68.2	57.9	60.8	63.9	3.18	0.57	0.83	0.28	0.06
E consumida kcal/d	12230	12044	12048	12204	12206	20.94	0.0008	≤0.0001	0.87	0.96
E excretada Kcal/d	1777.8	2227.4	2324.2	3009.2	2887.8	110.44	0.0001	0.0001	0.91	0.34
E Heces, Kcal/d	1535.0	1968.6	2042.2	2755.1	2603.3	110.47	≤0.0001	0.0001	0.73	0.33
E Orina, Kcal/d	243.3	258.8	282.0	254.2	284.5	28.77	0.4246	0.97	0.37	0.90
Digestibilidad de E <sup>2</sup> , %	87.3	83.7	82.7	77.0	78.2	1.12	0.0001	0.0003	0.93	0.34
E metabolizable, %	85.3	81.5	80.3	74.9	75.9	1.11	0.0001	0.0003	0.93	0.33

Medias de mínimos cuadrados. <sup>1</sup> Error Estándar de la Media. <sup>2</sup>Valores de digestibilidad fecal aparente. MS= Materia seca, N=Nitrógeno, E=Energía.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. Experimento 1. Determinación de la digestibilidad ileal aparente

Es conocido que los taninos del sorgo afectan la digestibilidad de los nutrientes y disminuyen el desempeño productivo de aves y cerdos (Duodu *et al.*, 2003; Mariscal-Landín *et al.*, 2004; Selle *et al.*, 2010). En este estudio se observó que los CDIA de materia seca, proteína y energía fueron superiores ( $\geq 6\%$ ) en las dietas elaboradas con sorgos bajos en taninos. Los CDIA de la materia seca y energía de las dietas bajas en taninos de este estudio son similares a los reportados por Nyannor y Adedokun (2007), sin embargo son menores a los reportados anteriormente (Lin *et al.*, 1987; Mariscal-Landín *et al.*, 2004) probablemente por el nivel de fibra de los sorgos y el peso de los animales (25 vs 40-60 Kg). Ambos factores se relacionan con la secreción endógena basal y específica a nivel ileal (Stein *et al.*, 1999), la fibra incrementa las pérdidas endógenas y aumenta el material indigestible; y el peso de los animales disminuye las pérdidas endógenas debido a un aumento en la capacidad proteolítica y un aumento en el área de absorción (Bell y Keith, 1989; Stein *et al.*, 1999; Presto *et al.*, 2010). Los CDIA de la proteína en las dietas bajas en taninos fueron menores a los reportados en otros estudios (Lin *et al.*, 1987; Yin *et al.*, 2002; Mariscal-Landín *et al.*, 2004; Nyannor y Adedokun, 2007; Mariscal-Landín *et al.*, 2010), estas diferencias observadas pueden atribuirse al peso de los animales, la calidad de la proteína de los sorgos y la concentración de proteína en la dieta. Nyannor y Adedokun (2007) evaluaron sorgos altamente digestibles, lo que disminuye las pérdidas endógenas específicas de proteína (Stein *et al.*, 2007). Y el incremento en la concentración de proteína en la dieta reduce relativamente las pérdidas endógenas de proteína, lo que resulta en un incremento en los CDIA conforme aumenta el nivel de proteína en la dieta (Bell y Keith, 1989; Stein *et al.*, 2007).

En las dietas altas en taninos se observaron CDIA de la proteína menores a los reportados por Mariscal-Landín *et al.* (2004), probablemente por la diferencia en los niveles de taninos. Se ha descrito que los sorgos altos en taninos ( $\geq 2\%$ ) contienen suficientes taninos para unirse a toda la proteína dietaria proveniente del grano de sorgo (Duodu *et al.*, 2003; Grootboom *et al.*, 2014) y las proteínas más afectadas por los taninos son las grandes, con una estructura abierta, que no contienen uniones con carbohidratos, y que son ricas en prolina, como las kafirinas (Grootboom *et al.*, 2014). Sin embargo, el nivel de kafirinas presentes en los sorgos evaluados no fue suficiente para afectar su digestibilidad. Grootboom *et al.* (2014) mencionan que la disminución en la digestibilidad de la proteína del sorgo es resultado de un proceso de calentamiento del grano que promueve la reordenación de las kafirinas en estructuras de lámina  $\beta$  y este cambio conformacional disminuye la susceptibilidad a la proteólisis de las kafirinas. Por otra parte, la digestibilidad de la proteína del sorgo depende de la sub-clase de kafirina presente, lo que determina su composición, la densidad, el tamaño, el número, la forma y la estructura de los cuerpos proteicos (Oria *et al.*, 2000; Grootboom *et al.*, 2014), por lo que es probable que no se observara un efecto significativo por la falta de diferencia en algunos de estos factores.

Los resultados obtenidos para los CDIA de isoleucina, leucina, lisina, metionina y fenilalanina son similares a los reportados por Yin *et al.* (2002) en sorgos bajos en taninos. Sin embargo, reportan valores más altos para cisteína, histidina, treonina y valina, lo que puede deberse a una mayor concentración de estos aminoácidos en los sorgos que evaluaron. El ácido glutámico, la alanina y el ácido aspártico son los aminoácidos más abundantes en las  $\alpha$ -kafirinas en comparación con las  $\beta$  o  $\gamma$ -kafirinas y la valina e histidina en las  $\gamma$ -kafirinas (Selle *et al.*, 2010), por lo que es posible que la disminución en los CDIA de estos aminoácidos por efecto del nivel de kafirinas se deba a la clase de kafirina presente en los sorgos, ya que algunos autores mencionan que la supresión de las  $\alpha$ -kafirinas (tipo A1) y  $\gamma$ -kafirinas (tipo 1 y 2) inhiben la formación de entrecruzamientos disulfuro entre los polipéptidos de

la superficie y entre estos con los de la matriz interna del grano de sorgo, lo cual favorece la proteólisis enzimática (Oria *et al.*, 2000; Grootboom *et al.*, 2014).

La disminución en los CDIA de los aminoácidos ácido aspártico, treonina, leucina, lisina, histidina, cisteína y metionina en las dietas altas en taninos se debe a la formación de complejos taninos-proteínas poco digestibles. Además, los taninos inhiben a las enzimas digestivas e incrementan la secreción de proteína endógena (Mariscal-Landín *et al.*, 2004; Selle *et al.*, 2010). Los sorgos altos en taninos contenían concentraciones mayores de FDN, lo contribuye a aumentar las pérdidas endógenas de proteína donde el ácido glutámico, el ácido aspártico, arginina y treonina son aminoácidos abundantes en la secreción endógena (Stein *et al.*, 1999; Reis de Souza *et al.*, 2013). Mariscal-Landín *et al.* (2004) mencionan que los aminoácidos menos digestibles en dietas a base de sorgo son arginina, treonina y cisteína lo que coincide con los resultados de este estudio. Estos autores sugieren que la baja digestibilidad de la treonina puede deberse a la estimulación en la secreción endógena de mucina provocada por los taninos, y la baja digestibilidad de la arginina a la capacidad de este aminoácido para estimular la unión entre proteínas y taninos y a su baja concentración en la proteína del sorgo, ya que los sorgos utilizados son bajos en treonina y cisteína. Además, se ha observado que la cisteína se incorpora a las mucinas intestinales y al tripéptido glutatión antioxidante para proteger la mucosa de daños externos (Bertolo *et al.*, 2005), que podría ser el caso de los taninos. No obstante, los CDIA de la arginina son menores a los sorgos evaluados en otros estudios (Lin *et al.*, 1987; Yin *et al.*, 2002; Mariscal-Landín *et al.*, 2004), lo que puede deberse a que los sorgos de este estudio tienen una menor concentración de arginina y una mayor concentración de taninos.

Los aminoácidos leucina, ácido glutámico metionina y fenilalanina tuvieron los CDIA más altos. En otros estudios estos aminoácidos del sorgo han tenido los CDIA más altos (Lin *et al.*, 1987; Selle *et al.*, 2010). Sin embargo, estos autores reportan valores más altos que los observados en este estudio lo cual puede deberse a que una gran proporción en la variación de los CDIA está relacionada

con el contenido de aminoácidos en los granos, ya que pequeños cambios en los niveles de aminoácidos endógenos pueden provocar grandes cambios en la digestibilidad aparente de los aminoácidos al estar expresados como porcentajes (Hodgkinson *et al.*, 2000).

La absorción de prolina es dependiente de la proteína de la dieta, glicina comparte la vía de absorción con prolina (Hodgkinson *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2011). Cuando los animales son alimentados con dietas libres de proteína entran en un balance de nitrógeno negativo y los niveles de prolina y en menor medida de glicina se encuentran usualmente en niveles muy altos en la digesta ileal, esto se debe al recambio muscular requerido para suplir los aminoácidos en el metabolismo (Hodgkinson *et al.*, 2000). En dietas bajas o libres de proteína, prolina es el aminoácido más abundante en la digesta y suele encontrarse en concentraciones superiores a dos veces la cantidad de glicina, similar a lo observado en este estudio. Por otra parte, prolina es el producto de degradación de los aminoácidos arginina, glutamato y glutamina, los cuales tienen una tasa de degradación del 40% en el intestino delgado (Wu *et al.*, 2011), y el sorgo es rico en ácido glutámico. Por lo que los CDIA de glicina y prolina altamente negativos puedan deberse a la baja concentración de proteína en las dietas y a la degradación de otros aminoácidos. Sauer y Ozimek (1986) mencionan que la digestibilidad de histidina, glicina y prolina es más susceptible a disminuir en sorgos altos en taninos. Por otra parte, glicina, arginina y alanina son los aminoácidos más afectados por el nivel de proteína en la dieta (Reis de Souza *et al.*, 2013). Aunado a esto, el animal aumenta la secreción de proteínas salivares que se unen a los taninos (TBSPs, tannin-binding salivary proteins) y la secreción endógena de mucinas a nivel intestinal (Stein *et al.*, 1999; Alonso-Díaz *et al.*, 2012), las cuales son ricas en prolina y glicina y pobremente digestibles. Todos estos factores pueden haber contribuido al efecto observado en los CDIA de glicina y prolina, los cuales fueron fuertemente negativos. Sin embargo, aun en las dietas bajas en taninos se observó este efecto, lo cual puede deberse al diseño experimental en el que cada animal recibió una dieta diferente en cada periodo, lo que podría haber

provocado cambios fisiológicos compensatorios que no regresaron a la normalidad al cambiar entre las dietas, debido al periodo de adaptación en periodos tan cortos y al consumo prolongado de dietas bajas en proteína (Hodgkinson *et al.*, 2000).

Se ha observado que los taninos disminuyen la hidrólisis del almidón cuando interaccionaron con la  $\alpha$ -amilasa y la  $\alpha$ -glucosidasa antes de su interacción con el sustrato (Mkandawire *et al.*, 2013), lo que es posible en el grano de sorgo debido a que se encuentra rodeado de cuerpos proteicos que disminuyen el acceso de las enzimas. En este estudio se observó la disminución en los CDIA del almidón provocado por la disminución de la digestibilidad de la amilopectina en las dietas altas en taninos. La amilopectina es el componente más abundante del almidón del sorgo y su estructura altamente ramificada le confiere una estructura más abierta que incrementa el acceso de las enzimas, por lo que al ser el mayor sustrato para las amilasas los taninos afectan su digestibilidad en mayor proporción que a la amilosa. Otros autores mencionan que los grupos hidroxilo de los taninos forman fuertes uniones hidrofóbicas con la amilosa debido a su estructura lineal que le confiere menor área de superficie y más uniones de hidrógeno intramoleculares (Barros *et al.*, 2012). Sin embargo, en este estudio no se observaron efectos de la dieta sobre la digestibilidad de la amilosa.

## **7.2. Experimento 2. Determinación de urea y glucosa plasmática**

Cuando los carbohidratos son ofrecidos en forma de almidón la absorción es lenta debido a que el almidón debe ser convertido a monosacáridos antes de ser absorbido (Arleth *et al.*, 2000), por lo que es probable que el pico de glucosa observado durante la primera hora postprandial en todas las dietas pueda deberse a la adición de sacarosa en la dieta, el cual disminuye de forma precipitada por acción de la insulina. Sin embargo, el almidón puede clasificarse de acuerdo a su velocidad de digestión en almidones rápidamente digeribles, los cuales elevan los

niveles de glucosa en los primeros 20 minutos después de su ingestión; almidones lentamente digestibles que se digieren de 20-120 minutos posteriores a su ingestión y almidones resistentes ( $\geq 120$  minutos) (Kempen *et al.*, 2010). Según los datos observados en este estudio el almidón del sorgo puede clasificarse como lentamente digestible por efecto de las kafirinas ya que se observó un aumento en la glucosa plasmática después de 120 minutos de la ingestión o como almidón resistente por efecto de los taninos. La concentración de almidón en el sorgo es similar a la de otros cereales, sin embargo la estructura del almidón dentro del endospermo favorece su baja disponibilidad. Al minuto 300 posterior al consumo los niveles plasmáticos en las dietas altas en taninos fueron inferiores a los niveles observados en las dietas bajas en taninos lo que puede indicar que los taninos aumentan la resistencia a la digestión del almidón, ya que como se observó en este estudio los taninos disminuyeron la digestión de la amilopeptina, la cual tiene una alta relación con el nivel de glucosa plasmático al ser la fuente más abundante de carbohidratos en el sorgo. Al minuto 360 las dietas altas en taninos regresan a su nivel basal, mientras que las dietas bajas en taninos aún se mantienen superiores a la concentración basal, lo cual se debe a la disminución de la actividad de la  $\alpha$ -amilasa y del sustrato provocado por la interacción con los taninos (Mkandawire *et al.*, 2013). Estos factores disminuyen la digestión del almidón, incrementan el almidón resistente y contribuyen a reducir el índice glicémico (Mkandawire *et al.*, 2013). Las diferencias en el patrón de absorción de la glucosa puede favorecer una mayor síntesis muscular en las dietas bajas en taninos, ya que se ha descrito que animales que consumen alimentos con mayor índice glicémico tienen un mayor consumo de alimento y por lo tanto una mayor ganancia de peso, ya que los almidones lentamente digeribles aumentan los niveles de saciedad debido a su efecto en la glucosa plasmática (Mkandawire *et al.*, 2013; Doti *et al.*, 2014).

La concentración de urea plasmática es un indicador del suministro y utilización de la proteína dietaria (Liu *et al.*, 2015). Los niveles bajos de urea indican un buen balance de aminoácidos, y sugieren una baja síntesis de urea y alta eficiencia de

la utilización de la proteína de la dieta (Liu *et al.*, 2015). La digestibilidad de la proteína y aminoácidos fue mejor en las dietas bajas en taninos, sin embargo tuvieron niveles de urea plasmática superiores a las dietas altas en taninos, lo que sugiere que existe una mayor absorción y disponibilidad de proteína como consecuencia de su mayor digestibilidad, pero al ser una dieta que no satisface los requerimientos nutricionales del animal debido a su pobre perfil de aminoácidos esenciales, principalmente lisina, metionina y triptófano, se observó una tasa de desaminación superior, lo que incrementó los niveles plasmáticos de urea. En general, la dieta BTAK tuvo los niveles más altos de urea plasmática y también excretó los niveles más altos de nitrógeno en orina. Esto puede deberse a la modificación de los aminoácidos a nuevos péptidos después de la absorción los cuales no son eficientemente utilizados para la deposición de la proteína; o a la asincronía en la digestión de la proteína y el almidón y la absorción de los aminoácidos y la glucosa (Abdollahi *et al.*, 2014). Por otro lado, existe un costo metabólico ligado a la excreción de nitrógeno, por lo que el incremento en los niveles de urea plasmática se relaciona con una disminución en el valor energético de la dieta

### **7.3. Experimento 3. Balance de nitrógeno y energía**

La excreción de nutrientes es proporcional al consumo. Aunque factores anti nutricionales como los taninos afectan la utilización de los nutrientes por el animal. En este estudio los animales consumieron la misma cantidad de alimento, sin embargo los animales alimentados con sorgos altos en taninos tuvieron la mayor excreción de materia seca y por lo tanto la menor digestibilidad fecal. Además de los taninos, estos sorgos contenían niveles más altos de FDN lo que puede contribuir a una mayor excreción de materia seca al incrementar la tasa de pasaje en el tracto digestivo y disminuir la digestibilidad de la materia seca, la energía y la proteína cruda (Noblet y Perez, 1993; Adeola, 2001; Ji *et al.*, 2008). Se ha observado que la digestibilidad fecal de la materia seca, la energía y el nitrógeno

del maíz es superior a la digestibilidad del sorgo (Healy *et al.*, 1994), situación similar a la observada en este estudio. Contrario a esto, otros autores (Lin *et al.*, 1987; Nyannor y Adedokun, 2007) reportan que no existen diferencias en la digestibilidad fecal aparente de materia seca, nitrógeno y energía entre en el maíz y el sorgo. Sin embargo, Nyannor y Adedokun (2007) evaluaron sorgos normales y altamente digestibles contra dietas a base de maíz y la falta de diferencia en la digestibilidad la atribuyen a la alta variación en sus resultados. La digestibilidad fecal aparente de la materia seca y nitrógeno del maíz y los sorgos bajos en taninos es similar a la observada en otros estudios (Nyannor y Adedokun, 2007; Ji *et al.*, 2008). Sin embargo, son menores a los reportados por otros autores (Lin *et al.*, 1987; Healy *et al.*, 1994).

El consumo de nitrógeno entre los tratamientos fue diferente como consecuencia de la formulación de la dieta a lisina digestible, por lo que las dietas altas en taninos consumieron la mayor cantidad de nitrógeno para compensar la disminución en la digestibilidad de sus nutrientes. Debido a esto se observaron diferencias en el nitrógeno excretado total (g/d), ya que es sabido que la excreción de nitrógeno tiene una alta correlación (0.96) con el nitrógeno consumido (Otto *et al.*, 2003; Shirali *et al.*, 2012). Por otra parte, algunos autores mencionan que la retención de nitrógeno es independientemente de la cantidad de nitrógeno consumido (g/d), similar a lo observado en este estudio donde no se observaron diferencias en la retención de nitrógeno (g/d) entre los tratamientos, lo que puede deberse a que las dietas se formularon a lisina digestible lo que compensa las posibles diferencias. Estos resultados contrastan con otros autores que observaron diferencias en la retención de nitrógeno (g/d) entre animales que consumieron maíz o sorgo (Lin *et al.*, 1987) o diferentes concentraciones de proteína en la dieta (Otto *et al.*, 2003). No obstante la retención de nitrógeno como porcentaje del consumido entre el maíz y el sorgo fue diferente, similar a (Lin *et al.*, 1987), lo que puede deberse a que los animales retienen la misma cantidad de nitrógeno, pero no la misma proporción. No se observó una diferencia ocasionada por el nivel de taninos o kafirinas sobre la retención de nitrógeno en relación al

consumido o al absorbido, esta falta de diferencia podría deberse a la alta excreción de nitrógeno en orina de la dieta BTAK causada por la interacción de los taninos con las kafirinas, ya que se ha descrito que las diferencias en la excreción de nitrógeno en orina sugieren una ineficiencia en la utilización metabólica del nitrógeno causada por la incapacidad para asimilar los aminoácidos y no a la digestión, aunado a esto ésta dieta tuvo los valores de urea plasmática más altos a consecuencia de una mayor desaminación provocada por la pobre calidad de su proteína.

Las diferencias en la excreción de energía en heces se deben a su relación con el consumo y a la disminución de la digestibilidad fecal de la energía causada por el nivel de taninos, y posiblemente por el nivel de fibra en la dieta. Sin embargo, no se observaron diferencias en la excreción de energía en la orina, esta diferencia podría deberse a que los animales que consumieron dietas altas en taninos consumieron una cantidad mayor de proteína, lo que aumenta las pérdidas de energía en forma de calor corporal, lo que podría estar relacionado con la mayor excreción de nitrógeno en orina.

## 8. CONCLUSIONES

La digestibilidad fecal de la materia seca, energía y nitrógeno del maíz fue mejor que la de los sorgos evaluados.

Los taninos modificaron la digestibilidad ileal aparente de la mayoría de los nutrientes del sorgo y la digestibilidad fecal de la materia seca y energía. Como consecuencia se modificaron la cantidad y el patrón de absorción de glucosa y urea. En la interacción de los taninos con las kafirinas se observó una tendencia a disminuir el nitrógeno retenido.

Las kafirinas del sorgo afectaron la digestibilidad ileal de algunos aminoácidos, sin embargo esto no modificó la digestibilidad ileal o total de la proteína o la retención de nitrógeno. Sin embargo, es necesario evaluar niveles más altos de kafirinas con la finalidad de observar un posible efecto.

## 9. REFERENCIAS

1. Abdollahi, M.R., Ravindran, V., Svihus, B., 2014. Influence of feed form on growth performance, ileal nutrient digestibility, and energy utilisation in broiler starters fed a sorghum-based diet. *Livestock Science* 165, 80-86.
2. Acamovic, T., Brooker, J.D., 2005. Biochemistry of plant secondary metabolites and their effects in animals. *Proceedings of the Nutrition Society* 64, 403-412.
3. Adeola, O., 2001. Digestion and balance techniques in pigs.
4. Alonso-Díaz, M.A., J. F. J. Torres-Acosta, C. A. Sandoval-Castro, Capetillo-Leal., C.M., 2012. Amino acid profile of the protein from whole saliva of goats and sheep and its interaction with tannic acid and tannins extracted from the fodder of tropical plants. *Small Ruminant Research* 103, 69-74.
5. AOAC, 2000. *Official Methods of Analysis*. Assoc. Offic. Anal. Chem, Arlington, VA. USA.
6. Arleth, T., Andreassen, S., Orsini-Federici, M., 2000. A model of glucose absorption from mixed meals. 4th IFAC Symposium, Karlsburg/Greifswald, Germany.
7. Barros, F., Awika, J.M., 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, 11609-11617.
8. Belton, P.S., Delgadillo, I., Halford, N.G., Shewry, P.R., 2006. Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science* 44, 272286.
9. Bell, J.M., Keith, M.O., 1989. Factors affecting the digestibility by pigs of energy and protein in wheat, barley and sorghum diets supplemented with canola meal. *Animal Feed Science and Technology* 24, 253265.
10. Benz, J.M., Tokach, M.D., Dritz, S.S., Nelssen, J.L., Derouchey, J.M., Sulabo, R.C., Goodband, R.D., 2011. Effects of increasing choice white grease in corn- and sorghum-based diets on growth performance, carcass

characteristics, and fat quality characteristics of finishing pigs. *Journal of animal science* 89, 773-782.

11. Bertolo, R., Pencharz, P., Ball, R., 2005. Role of intestinal first-pass metabolism on whole-body amino acid requirements In: DG, B., H, M. (Eds.), *Biology of Metabolism in Growing Animals*. W.B. Saunders Company, p. 483.
12. Bhattacharya, A., Rice, N., Shapter, F., Norton, S., Henry, R., 2011. Sorghum. *Sorghum*, 397-406.
13. Black, J.L., Hughes, R.J., Nielsen, S.G., Tredrea, A.M., 2005. The energy value of cereal grains, particularly wheat and sorghum, for poultry. *The energy value of cereal grains, particularly wheat and sorghum, for poultry*.
14. Camp, L.K., Southern, L.L., 2003. Effect of carbohydrate source on growth performance, carcass traits, and meat quality of growing-finishing pigs. *Journal of animal science*.
15. Charlton, A.J., Baxter, N.J., Khan, M.L., 2002. Polyphenol/peptide binding and precipitation. *Journal of Agricultural and food chemistry*.
16. De MoraesCardoso, L., Pinheiro, S.S., 2015. Sorghum (*sorghum bicolor* L.): Nutrients, Bioactive Compounds, and Potential Impact on Human Health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.
17. Doti, S., Suárez-Belloch, J., Latorre, M., Guada, J., Fondevila, M., 2014. Effect of dietary starch source on growth performances, digestibility and quality traits of growing pigs. *Livestock Science* 164, 119127.
18. Drew, M.D., Schafer, T.C., Zijlstra, R.T., 2012. Glycemic index of starch affects nitrogen retention in grower pigs. *Journal of animal science* 90, 1233-1241.
19. Duodu, K.G., Taylor, J.R.N., Belton, P.S., Hamaker, B.R., 2003. Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science* 38, 117131.
20. FEDNA, 2000. Almidón. Método polarimétrico (EWERS). España.

21. Grootboom, A., N. Mkhonza, Z. Mbambo, M. O'Kennedy, L. Silva, J.T., J. Taylor, R. Chikwamba, Mehl, L., 2014. Co-suppression of synthesis of major  $\alpha$ -kafirin sub-class together with  $\gamma$ -kafirin-1 and  $\gamma$ -kafirin-2 required for substantially improved protein digestibility in transgenic sorghum. *Plant Cell Reports* 33, 521537.
22. Healy, B.J., Hancock, J.D., Kennedy, G.A., 1994. Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs. *Journal of Animal Science* 72, 2227-2236.
23. Hodgkinson, S.M., Moughan, P.J., Reynolds, G.W., 2000. Effect of the duration of feeding of a protein-free diet on endogenous ileal nitrogen and amino acid loss in the growing pig. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80, 1407-1412.
24. INRA, 1984. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France.
25. Jansman, A.J.M., 1993. Tannins in feedstuffs for simple-stomached animals. *Nutrition Research Reviews*.
26. Ji, F., Casper, D.P., Brown, P.K., Spangler, D.A., Haydon, K.D., Pettigrew, J.E., 2008. Effects of dietary supplementation of an enzyme blend on the ileal and fecal digestibility of nutrients in growing pigs. *Journal of animal science* 86, 1533-1543.
27. Kempen, T.A.T.G., Regmi, P.R., Matte, J.J., Zijlstra, R.T., 2010. In vitro starch digestion kinetics, corrected for estimated gastric emptying, predict portal glucose appearance in pigs. *The Journal of nutrition* 140, 1227-1233.
28. King, D., Fan, M.Z., Ejeta, G., Asem, E.K., Adeola, O., 2000. The effects of tannins on nutrient utilisation in the White Pekin duck. *Br. Poult. Sci.* 41, 630-639.
29. Kole, C., 2007. Genome mapping and molecular breeding in plants. *Cereals and Millets Volume I*.

30. Lin, F.D., Knabe, D.A., Tanksley, T.D., 1987. Apparent digestibility of amino acids, gross energy and starch in corn, sorghum, wheat, barley, oat groats and wheat middlings for growing pigs. *Journal of animal science*.
31. Liu, S., P. Selle, S. Court, Cowieson., A., 2013a. Protease supplementation of sorghum-based broiler diets enhances amino acid digestibility coefficients in four small intestinal sites and accelerates their rates of digestion. *Animal Feed Science and Technology* 183, 175183.
32. Liu, S.Y., Selle, P.H., Cowieson, A.J., 2013b. The kinetics of starch and nitrogen digestion regulate growth performance and nutrient utilisation of broilers fed coarsely ground, sorghum-based diets. *Animal Production Science*.
33. Liu, Y., Kong, X., Jiang, G., Tan, B.e., Deng, J., Yang, X., Li, F., Xiong, X., Yin, Y., 2015. Effects of dietary protein/energy ratio on growth performance, carcass trait, meat quality, and plasma metabolites in pigs of different genotypes. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6, 36.
34. Mariscal-Landín, G., Avellaneda, J.H., Souza, T.C.R.d., Aguilera, A., Borbolla, G.A., Mar, B., 2004. Effect of tannins in sorghum on amino acid ileal digestibility and on trypsin (E.C.2.4.21.4) and chymotrypsin (E.C.2.4.21.1) activity of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 117, 245264.
35. Mariscal-Landín, G., de Souza, R.T.C., 2006. Endogenous ileal losses of nitrogen and amino acids in pigs and piglets fed graded levels of casein. *Archives of Animal Nutrition*.
36. Mariscal-Landín, G., de Souza, R.T.C., Avalos, M.A., 2010. Ileal amino acids digestibility of sorghum in weaned piglets and growing pigs. *animal* 4.
37. Mesa-Stonestreet, N., Alavi, S., Bean, S., 2010. Sorghum Proteins: The Concentration, Isolation, Modification, and Food Applications of Kafirins. *Journal of Food Science* 75.
38. Mkandawire, N.L., Kaufman, R.C., Bean, S.R., Weller, C.L., Jackson, D.S., Rose, D.J., 2013. Effects of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) tannins

- on  $\alpha$ -amylase activity and in vitro digestibility of starch in raw and processed flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61, 4448-4454.
39. Myers, W.D., Ludden, P.A., Nayigihugu, V., 2004. Technical Note: A procedure for the preparation and quantitative analysis of samples for titanium dioxide. *Journal of Animal Science*.
  40. Noblet, J., Perez, J.M., 1993. Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets from chemical analysis. *Journal of animal science*.
  41. NOM-062-ZOO-1999, 2001. Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. *Diario Oficial de la Federación, México D.F.*
  42. NRC, 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. In: 11th (Ed.). The National Academy Press, Washington, DC.
  43. Nyamambi, B., Ndlovu, L.R., Naik, Y.S., Kock, N.D., 2007. Intestinal growth and function of broiler chicks fed sorghum based diets differing in condensed tannin levels. *South African Journal of Animal Science* 37, 202-214.
  44. Nyannor, E.K.D., Adedokun, S.A., 2007. Nutritional evaluation of high-digestible sorghum for pigs and broiler chicks. *Journal of Animal ....*
  45. Oria, M.P., Hamaker, B.R., Axtell, J.D., Huang, C.P., 2000. A highly digestible sorghum mutant cultivar exhibits a unique folded structure of endosperm protein bodies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 97.
  46. Otto, E.R., Yokoyama, M., Ku, P.K., Ames, N.K., Trottier, N.L., 2003. Nitrogen balance and ileal amino acid digestibility in growing pigs fed diets reduced in protein concentration. *Journal of animal science* 81, 1743-1753.
  47. Presto, H.M., Lyberg, K., Lindberg, J.E., 2010. Effect of body weight on ileal endogenous nitrogen and amino acid loss in PVTC-cannulated pigs. *Livestock Science* 134, 1820.

48. Ramírez, R.E., Anaya, E.A., Marisca, L.G., 2005. Predicción de la composición química del grano de sorgo mediante espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS). *Técnica Pecuaria México* 43.
49. Rao, P.S., Kumar, C.G., 2012. Characterization of improved sweet sorghum cultivars. *Characterization of improved sweet sorghum cultivars*.
50. Ravindran, V., P. C. H. Morel, G. G. Partridge, M. Hruby, Sands, J.S., 2006. Influence of a *E. coli*-derived phytase on nutrient utilization in broiler starts fed diets containing varying concentrations of phytic acid. *Poult. Sci.* 85, 82-89.
51. Regmi, P., Matte, J., Van Kempen, T., Zijlstra, R., 2010. Starch chemistry affects kinetics of glucose absorption and insulin response in swine. *Livestock Science* 134, 4446.
52. Regmi, P.R., Metzler-Zebeli, B.U., Gänzle, M.G., van Kempen, T.A.T.G., Zijlstra, R.T., 2011. Starch with high amylose content and low in vitro digestibility increases intestinal nutrient flow and microbial fermentation and selectively promotes bifidobacteria in pigs. *The Journal of nutrition* 141, 1273-1280.
53. Reis de Souza, T., Barreyro, A., Mariscal-Landín, G., 2013. Estimation of endogenous protein and amino acid ileal losses in weaned piglets by regression analysis using diets with graded levels of casein. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 4, 36.
54. Reis de Souza, T., Mar, B., LG, M., 2000. Canulación de cerdos posdestete para pruebas de digestibilidad ileal: Desarrollo de una metodología. *Técnica Pecuaria México* 38, 143-150.
55. Salinas, I., Pró, A., Salinas, Y., Sosa, E., Becerril, C., Cuca, M., Cervantes, M., Gallegos, J., 2006. Compositional variation amongst sorghum hybrids: Effect of kafirin concentration on metabolizable energy. *Journal of Cereal Science* 44, 342346.
56. Sauer, W.C., Ozimek, L., 1986. Digestibility of amino acids in swine: results and their practical applications. A review. *Livestock Production Science*.

57. Selle, P.H., Cadogan, D.J., Li, X., Bryden, W.L., 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology* 156, 5774.
58. Shelton, J.L., Matthews, J.O., Southern, L.L., 2004. Effect of nonwaxy and waxy sorghum on growth, carcass traits, and glucose and insulin kinetics of growing-finishing barrows and gilts. *Journal of Animal ....*
59. Shirali, M., Doeschl-Wilson, A., Knap, P.W., 2012. Nitrogen excretion at different stages of growth and its association with production traits in growing pigs. *Journal of Animal Science*.
60. SIAP, 2015. Atlas Agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
61. Soraci, A.L., Amanto, F., Pérez, D.S., Martínez, G., 2010. Metodología del cateterismo yugular en lechones de destete. *Analecta Veterinaria* 30.
62. Stefoska-Needham, A., Beck, E.J., Johnson, S.K., Tapsell, L.C., 2015. Sorghum: An Underutilized Cereal Whole Grain with the Potential to Assist in the Prevention of Chronic Disease. *Food Reviews International* 31, 401-437.
63. Stein, H.H., Sève, B., Fuller, M.F., Moughan, P.J., de Lange, C.F.M., on, t., Digestibility, C.A.A., 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *Journal of animal science* 85, 172180.
64. Stein, H.H., Trottier, N.L., Bellaver, C., 1999. The effect of feeding level and physiological status on total flow and amino acid composition of endogenous protein at the distal ileum in swine. *Journal of Animal Science*.
65. Svihus, B., Uhlen, A.K., Harstad, O.M., 2005. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. *Animal Feed Science and Technology* 122, 303320.
66. Taylor, J., Bean, S.R., Ioerger, B.P., Taylor, J.R.N., 2007. Preferential binding of sorghum tannins with  $\gamma$ -kafirin and the influence of tannin binding

on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science* 46, 2231.

67. USDA, 2015. Sorghum Area, Yield, and Production.
68. Van Soest, P.J., J.B. Robertson, Lewis, B.A., 1991. Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74, 3583-3597.
69. Wolter, A., Hager, A.-S., Zannini, E., Arendt, E.K., 2013. In vitro starch digestibility and predicted glycaemic indexes of buckwheat, oat, quinoa, sorghum, teff and commercial gluten-free bread. *Journal of Cereal Science* 58, 431436.
70. Wong, J., Tsang, L., Nick, C., Jaswinder, S., Jeffrey, F.P., William, H.V., William, J.H., Jeff, D.W., Peggy, G.L., Bob, B.B., 2009. Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. *Journal of Cereal Science* 49, 7382.
71. Wu, G., Bazer, F., Burghardt, R., Johnson, G., Kim, S., Knabe, D., Li, P., Li, X., McKnight, J., Satterfield, M.C., Spencer, T., 2011. Proline and hydroxyproline metabolism: implications for animal and human nutrition. *Amino Acids* 40, 1053-1063.
72. Yin, Y.L., Gurung, N.K., Jeurond, E.A., Sharpe, P.H., 2002. Digestible energy and amino acid contents in Canadian varieties of sorghum, pearl millet, high-oil corn, high-oil-high-protein corn and regular corn samples for growing pigs. *Canadian Journal of Animal Science* 82, 385-391.