



**Universidad Nacional Autónoma de México.**

**Maestría y Doctorado en Ciencia de la Producción y de la Salud Animal.**

**Evaluación de dietas para cerdos en crecimiento elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali y alimentados en forma de pasta.**

**Tesis**

**Que para optar por el grado de:**

**Maestra en ciencias**

**Presenta**

**Edna Belem Gaspar Lara**

**Tutor principal:**

**Dr. José Antonio Cuarón Ibargüengoytia**

**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencia de la Producción y de la Salud Animal.**

**Miembros del comité tutor:**

**Dr. Luis Corona Gochi**

**Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia**

**Dr. James Eugene Pettigrew**

**University of Illinois at Urbana Champaign**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Octubre 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 mis padres (Belem Lara y Jorge Gaspar)***, mi razón de vida, quienes sin duda han sido mis guías y mi inspiración para cada logro. Los amo!!!!

***A mis hermanos (Jennifer Gaspar y Eduardo Gaspar)***, quienes sin duda me acompañaron en las buenas y en las malas a pesar de la distancia que nos separaba.

## **Agradecimientos.**

El estudiar una maestría fue algo que siempre me propuse cumplir después de concluir la licenciatura, viendo una excelente oportunidad en la producción animal.

El haber llegado hasta aquí (casi maestra en ciencias), ha implicado un gran trabajo y esfuerzo, que sin duda han valido hacerlo, pero esto no es solo mío, ya que la gente que estuvo a mi lado fue una gran motivación para dar ese primer paso y culminarla, y alimentando siempre las ganas de querer ser alguien mejor. Familia, amigos, tutores y profesores, hicieron que este gran camino recorrido fuese algo más placentero, lleno de logros, retos, tristezas, alegrías, en fin, un sinnúmero de emociones que me han hecho la persona que hoy soy y quienes me dieron grandes lecciones de vida.

El primer agradecimiento es a mi tutor, el Dr. José Antonio Cuarón Ibarquengoytia, uno de los mejores en el área de nutrición porcina en México, sin duda fue la persona que me inspiró a luchar por tener un lugar en la producción de cerdos y quien me dio su credibilidad para desarrollar diferentes proyectos y dirigirme durante mis estudios de posgrado. Sin duda me llevo muchas enseñanzas y aprendizajes suyos. Es un orgullo haber formado parte de su equipo.

Quiero agradecer a los miembros de mi comité tutor, Dr. Luis Corona Gochi y Dr. James Eugene Pettigrew, y al Dr. Diego Braña, por su apoyo durante la maestría y mi desarrollo profesional y de la tesis.

Víctor Balderrama, a quien admiro mucho como persona y nutricionista, sin duda fue el más grande apoyo en todo, estuvo presente en los momentos más felices y en los más difíciles de este camino, enseñándome a salir adelante sin bajar la mirada frente a los problemas y sobre todo luchar por cada objetivo propuesto. MIL GRACIAS!!!!

A mis compañeros y amigos del INIFAP, Nancy C., Alejandra, Arturo, Q. Erika Ramírez, Javi, Clara, Nancy, César, Gaby, Martín, Diego y a todos los trabajadores, Vicente, Mario, Millo, Yessi, Don Felipe, Danny, sin ellos el trabajo no hubiera sido tan divertido.

Una vez más quiero agradecer a mis padres y hermanos, que pese a la distancia me dieron su confianza, amor y sacrificios, no tengo con que pagar cada cosa y/o sacrificio hecho por mí. No les fallaré!!!!

Y por último, y por supuesto muy importante a mi primo Gerardo Lara y amiga Andrea Hernández, dos personas muy importantes en mi vida, quienes me han enseñado grandes lecciones de vida, personas que admiro, y siempre estuvieron ahí para decirme una palabra de aliento y me daban las ganas y la fortaleza para querer superarme cada vez más.

*“Tenemos que aprender a mirar cara a cara la realidad. Inventar, si es preciso, palabras nuevas e ideas nuevas para estas nuevas y extrañas realidades que nos han salido al paso. Pensar es el primer deber de la „inteligencia“. Y en ciertos casos, el único.”*

Octavio Paz.

## **Evaluación de dietas para cerdos en crecimiento elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali y alimentados en forma de pasta**

**Resumen.** Se condujeron dos experimentos con el fin de evaluar el efecto que tiene alimentar a cerdos en crecimiento con dietas que incluían maíz parcialmente hidrolizado en álcali. El experimento 1 fue conducido para determinar el tamaño de partícula del maíz molido y parcialmente hidrolizado en álcali, y la capacidad de retención de agua (CRA) de las diferentes dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali (MHA). Los resultados indicaron que la CRA incrementó y por lo tanto la relación agua:alimento, entre las dietas conforme la cantidad de maíz incrementó. El tamaño de partícula del maíz molido fue mayor comparado con el del MHA. El experimento 2 se condujo para evaluar el comportamiento productivo, comportamiento durante el consumo y digestibilidad de nutrientes y energía en cerdos en crecimiento alimentados con tres diferentes tratamientos: 1, grano de maíz convencional molido en harina (control); 2, MHAH (harina) y 3, MHAP (pasta). La digestibilidad mejoró ( $P<0.05$ ) en la primera fase de alimentación para los cerdos que fueron alimentados con MHA, sin importar la forma de ofrecer el alimento (pasta o harina) comparado con el tratamiento control. Los cerdos alimentados con MHAP redujeron ( $P<0.05$ ) el número de comidas, la duración de las comidas, el tiempo de ocupación en el comedero, y el número de visitas al bebedero comparado con los cerdos que consumieron el alimento de MHAH. El comportamiento productivo acumulado (consumo de alimento, ganancia diaria de peso y eficiencia alimenticia) fue similar entre tratamientos. La digestibilidad del Nitrógeno y de la energía mejoró cuando se usó MHAP. Los resultados sugieren que el uso de MHAP puede contribuir a mejorar la productividad de los cerdos.

**Palabras clave:** Maíz, hidrólisis alcalina, alimentación, cerdos.

**Abstract.** Two experiments were conducted to investigate the effect of feeding growing pigs with partially hydrolyzed alkaline corn (AHC). The objective of the Exp. 1 was to determine AHC and ground corn (GC) on particle size, as well as water holding capacity (WHC) of the different AHC diets. Results of Exp. 1 indicated that the WHC and the water:corn ratio increased as more corn was included in the diets. The particle size in GC was higher than AHC. In Exp. 2 evaluated the performance, feeding behavior and the digestibility of energy and nutrients in growing pigs fed with three diets: 1, GC in meal form

(control), 2, AHC in meal form and 3, AHC in paste form. The digestibility in AHC diets (phase 1) was greater ( $P < 0.05$ ) on the first feeding phase of pigs fed with AHC, regardless how the feed was offered (meal or paste) compared to the control treatment. The number of meals, duration of meal, feeder occupation and drinker visits were reduced in pigs fed with the AHC diet in paste form. The overall performance of pigs (feed intake, average daily gain and feed efficiency) was similar between treatments. The digestibility of nitrogen and energy were improved in the pigs fed with the AHC diets. The results suggest that feeding pigs with AHC in paste form can improve the performance of pigs.

**Palabras clave:** Corn, Alkaline hydrolysis, feeding, pigs.

## Índice

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | Introducción .....   | 9  |
| II.  | Hipótesis .....  | 10 |
| III. | Objetivo general .....   | 11 |
| IV.  | Objetivos particulares.....  | 11 |
| V.   | Revisión de literatura .....   | 12 |
|      | 5.2 Planta de Maíz .....   | 12 |
|      | 5.3 Estructura del grano de maíz .....   | 12 |
|      | 5.4 Composición química del grano de maíz.....   | 13 |
|      | 5.4.1 Carbohidratos.....   | 13 |
|      | 5.4.1.1.1 Digestibilidad del almidón .....   | 15 |
|      | 5.4.1.1.2 Gelatinización del almidón .....   | 17 |
|      | 5.4.2 Proteínas.....   | 18 |
|      | 5.4.3 Lípidos.....   | 19 |
|      | 5.5 Uso de tecnologías en los ingredientes utilizados para la elaboración de alimentos en cerdos ..... | 19 |
|      | 5.5.1 Molienda.....  | 20 |
|      | 5.5.2 Mezclado.....  | 20 |
|      | 5.5.3 Procesos térmicos.....   | 21 |
|      | 5.5.3.1 Extrusión .....  | 22 |
|      | 5.5.3.2 Peletizado.....  | 22 |
|      | 5.5.3.3 Nixtamalización .....  | 23 |
|      | 5.5.3.3.1 Métodos similares al proceso de nixtamalización.....   | 24 |
|      | 5.6 Sistemas de alimentación en cerdos .....   | 25 |
|      | 5.6.1 Alimentación húmeda.....   | 26 |
|      | 5.6.2 Alimentación líquido .....   | 26 |
|      | 5.6.3 Alimentación en forma de pasta .....   | 26 |
|      | 5.6.3.1.1 Estudios con alimentación en forma de pasta.....   | 28 |
| VI.  | Material y métodos.....  | 29 |
|      | 6.1 Experimento 1 .....  | 29 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.1.1 | Capacidad de retención de agua .....                           | 29 |
| 6.1.2 | Tamaño de partícula.....                                       | 29 |
| 6.2   | Experimento 2.....   | 30 |
| 6.2.1 | Sitio experimental y animales .....                            | 30 |
| 6.2.2 | Tratamientos y elaboración de las dietas.....                  | 31 |
| 6.2.3 | Comportamiento durante el consumo .....                        | 36 |
| 6.2.4 | Análisis estadístico .....                                     | 36 |
| VII.  | Resultados y discusión .....                                   | 37 |
| 7.1   | Experimento 1 .....  | 37 |
| 7.1.1 | Relación agua:alimento calculada con aerómetro .....           | 37 |
| 7.1.2 | Capacidad de retención de agua .....                           | 38 |
| 7.1.3 | Tamaño de partícula.....                                       | 39 |
| 7.2   | Experimento 2.....   | 40 |
| 7.2.1 | Composición de las dietas.....                                 | 40 |
| 7.2.2 | Comportamiento productivo y comportamiento durante el consumo. | 42 |
| 7.2.3 | Tamaño de partícula y coeficientes de digestibilidad .....     | 44 |
| 7.2.4 | Composición corporal.....                                      | 48 |
| VIII. | Conclusiones .....   | 49 |
| IX.   | Implicaciones .....  | 49 |
| X.    | Referencias.....   | 50 |

## I. Introducción

En la industria porcina las dietas para cerdos comúnmente no son procesadas más allá de la molienda y del mezclado. Sin embargo, debido al alto costo de los ingredientes incorporados a las dietas, se buscan estrategias que mejoren la biodisponibilidad de nutrientes en la materia prima, sin ningún procesamiento, a partir de tecnologías empleadas en el procesamiento esta. Con el uso de diferentes tecnologías en un mismo alimento se puede lograr mejorar la eficiencia alimenticia y la rentabilidad (Rojas, 2015).

El mezclado tiene como objetivo asegurar la distribución adecuada, de macro y micro ingredientes durante la fabricación de alimentos. Los aditivos que son añadidos en pequeñas cantidades como, aminoácidos cristalinos, enzimas, vitaminas y minerales deben ser mezclados apropiadamente ya que de esto depende que su distribución sea uniforme en la dieta. La molienda se utiliza comúnmente para reducir el tamaño de partícula y separar las fracciones del grano, ya que el pericarpio (estructura) concentra la mayor cantidad de fibra la cual protege al grano de la digestión y durante la molienda se logra romper esta estructura y ocurre la exposición del endospermo permitiendo con esto incrementar la superficie de contacto con las enzimas digestivas (Gorlachategui, 2010; Rojas, 2015). Hay algunos ingredientes crudos donde es necesario el uso de tratamientos térmicos, que tiene como objetivo separar componentes no digeribles del grano y la gelatinización de los almidones del mismo. El proceso más común donde se utiliza el tratamiento térmico es el peletizado el cual favorece el cocimiento de los ingredientes (gelatinización de almidones) mejorando la digestibilidad, principalmente de energía, disminuye el desperdicio de alimento y reduce de costos de transporte y almacenamiento (Wondra *et al.*, 1995). La extrusión es otro proceso térmico utilizado para favorecer las propiedades físicas de los alimentos, como densidad específica, forma y textura, además de eliminar compuestos antinutricionales termolábiles y lograr altas proporciones de gelatinización de los almidones (Hancock and Behnke, 2001).

La hidrólisis alcalina es otro proceso térmico con efectos físico-químicos, ya que suaviza el pericarpio lo cual puede tener mayor impacto en digestibilidad de nutrientes y energía, gelatinización de almidones y permite al grano la absorción de agua que puede aprovecharse para la elaboración de alimentos húmedos.

Los alimentos para cerdos pueden dividirse en dos grandes grupos, alimentos húmedos y alimentos secos. Los alimentos secos típicamente contienen el 90 % de materia seca y el 10% de humedad (Reiling, 2011). En el caso de los alimento húmedos están las dietas líquidas que son una mezcla de ingredientes o subproductos que típicamente contienen del 20 al 30% de materia seca, y una relación de agua:alimento comúnmente 1.5:1 a 4:1 kg/kg (Missotten *et al.*, 2015), y los alimentos en forma de pasta, elaborados a partir de un alimento seco mezclado con agua, en una relación agua:alimento  $>1.5:1$  kg/kg (Chávez, 2011). Para la elaboración del alimento en pasta es necesario que el grano del cereal sea sometido a un proceso térmico-alcálico (similar o igual a la nixtamalización), para que el grano tenga la capacidad de absorber agua, y favorezca la formación de la pasta. Ambos tipos de alimentación, alternativos a la alimentación seca (harina y pellet), pueden requerir la automatización del sistema de alimentación que conlleva a la reducción de mano de obra para alimentar a los animales. Otra ventaja del alimento en pasta es que permite tener un mejor control en la dosificación del alimento, ya que se pueden incrementar el número de comidas lo que reduce el desperdicio modificando los patrones de consumo y por lo tanto permite mayor precisión en el aporte de nutrientes de acuerdo a la etapa productiva. Para justificar la alimentación en pasta (Patente MX 327813 B) es necesario evaluar el mérito del proceso de la materia prima, el sistema de alimentación, la digestibilidad de nutrientes y energía y su efecto en el comportamiento productivo en cerdos en crecimiento.

## **II. Hipótesis**

El maíz sometido a una hidrólisis alcalina incrementará la capacidad de retención de agua que podría favorecer el consumo de alimento al tiempo que, por la hidrólisis, mejore la digestibilidad de nutrientes y la eficiencia alimenticia de cerdos en crecimiento a finalización.

## **III. Objetivo general**

Evaluar el comportamiento productivo de cerdos de crecimiento a finalización alimentados con dietas en forma de pasta que incluyan maíz parcialmente hidrolizado en álcali y generar coeficientes de digestibilidad de nutrientes que permitan calificar el impacto del proceso.

#### **IV. Objetivos particulares**

Determinar la capacidad máxima de retención de agua de las dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

Evaluar el comportamiento productivo de los cerdos alimentados con dietas en forma de pasta o harina.

Evaluar los patrones de comportamiento durante el consumo de alimento en forma de pasta o harina.

Determinar la digestibilidad de nutrientes y de energía del maíz parcialmente hidrolizado alcalinamente o no.

## V. Revisión de literatura

El maíz, cuyo nombre científico es *Zea mays L.* pertenece a la familia de las gramíneas, es uno de los cereales más importantes del mundo debido a las múltiples utilidades que posee para la alimentación animal y humana. Es uno de los cereales que comúnmente se emplea para la elaboración de dietas para cerdos en todo el mundo, debido a su bajo contenido de fibra y alta concentración de energía (Medel *et al.*, 2004). Es, además, una materia prima básica para la elaboración de distintos productos usados en la industria y el comercio (FAO, 1993). En 2013 y 2014 el reporte de la producción anual de granos de maíz en México fue de 22, 663, 953.35 y 23, 273, 256.54 toneladas, respectivamente. México normalmente se encuentra entre el sexto y octavo lugar de producción mundial de maíz (SIAP, 2014).

### 5.1 Planta de maíz

El maíz es una planta, de día corto, anual y de gran desarrollo vegetativo que puede alcanzar hasta 4 m de altura. Posee un sistema radicular de tipo fasciculado, formado por tres tipos de raíces: las raíces seminales (nacidas de la semilla); las raíces secundarias (que constituyen la casi totalidad del sistema radicular), y las raíces adventicias (que aparecen en el último lugar) a nivel de los primeros nudos situados por encima de la superficie del suelo (Fleury *et al.*, 1979). El tallo puede emitir varios brotes y llevar de 12 a 20 hojas de limbo cuando alcanzan un adecuado desarrollo (35 a 50 cm y 4 a 10 cm de ancho). Como sistema metabólico, su producto final es el almidón, el cual se deposita en órganos especializados llamados granos acomodados en olotes. Cada olote, dependiendo del número de hileras, el diámetro y la longitud puede contener de 300 a 1000 granos (FAO, 1993).

### 5.2. Estructura del grano de maíz

Los granos de maíz (Figura 1) se desarrollan mediante la acumulación de los productos de la fotosíntesis, y la absorción de tales productos se realiza a través de las raíces y el metabolismo de la planta en la inflorescencia femenina, llamada espiga. La estructura anatómica de todos los cereales es similar. Los granos de maíz son carióspsides desnudos constituidos por cuatro estructuras anatómicas mayores denominadas pericarpio (5.2%),

endospermo (82%), germen (12%) y cofia (0.8%) (Rojas, 2008), y su peso oscila entre los 100 y 600 mg.

El germen está formado por el escutelo, plúmula y radícula, el cual constituye entre el 10 a 12% del peso total del grano en base seca y se encuentra localizado en la porción más baja del endospermo (Rojas, 2008). El germen almacena nutrimentos y hormonas, los cuales son movilizados a todo el grano a través de enzimas sintetizadas durante las etapas iniciales de la germinación. Su composición está dada por proteínas (20%), grasas (34%), almidones (8%) y otros azúcares diferentes al almidón (12%) elementos minerales (10%), fibra cruda y hemicelulosa (14%), trazas de almidón y otros compuestos (2%). Aproximadamente el 60 % de las proteínas de esta estructura son globulinas y albúminas (Gutiérrez, 2006).

El endospermo representa aproximadamente del 80-83 % del peso total del grano en base seca, está constituido por dos regiones visuales y físicas conocidas como endospermo duro o translúcido y endospermo suave u opaco, ambos endospermos están comprimidos por la matriz proteica que encapsula el almidón. El endospermo está constituido principalmente de almidón (87%), proteínas (9%), grasas (1%), azúcares (0.5%), minerales (0.3%), fibra cruda (2%) y otros compuestos. Dentro del endospermo existen células alargadas donde se encuentran los gránulos de almidón, formados en celdas que contienen gránulos de 5 a 30 micras y están cubiertos por una matriz continua de proteínas hidrosolubles ligadas al medio granular del almidón, conocidas como globulina y albuminas.

El pericarpio es la estructura más externa de la semilla y representa el 5 a 6% del peso total del grano, es una membrana delgada, transparente, casi invisible, llamada cubierta del fruto. Esta estructura se adhiere a la superficie externa de la capa de aleurona y provee las propiedades semipermeables al grano del maíz. La capa más externa de tubos celulares es una hilera de tubos largos presionados fuertemente a la capa de aleurona. El pericarpio cuenta con una serie de células que poseen espacios u hoyos que le proveen interconexiones capilares entre todas las células, lo cual facilita la absorción de agua. La capa más externa (epidermis) está formada por una cubierta cerosa que puede retardar el intercambio de humedad. El pericarpio se extiende desde la base del grano hasta la punta

(Jiménez, 2014), tiene un bajo contenido de lignina y libera mucha de la hemicelulosa durante la cocción.

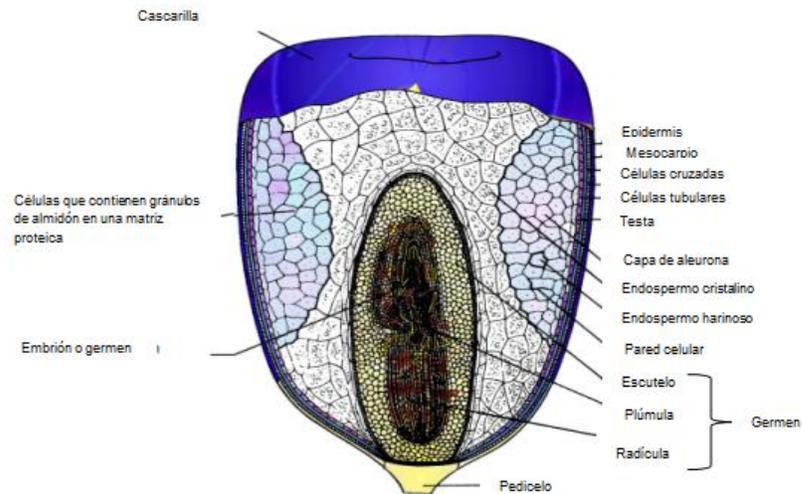


Figura 1. Estructuras del maíz (Modificado Véles, 2004)

### 5.3. Composición química del grano de maíz

#### 5.3.1. Carbohidratos

El grano maduro contiene además de almidón pequeñas cantidades de otros hidratos de carbono (azúcares simples y polisacáridos). Los azúcares simples constituyen aproximadamente el 2% del peso total del grano y de estos el 65% se encuentran en el germen; de ellos, el 69 % son glucosa, y también contienen monosacáridos (D-fructosa y D-glucosa en igual proporción) libres del endospermo, disacáridos como sacarosa y maltosa y trisacáridos como rafinosa, y oligosacáridos (FAO, 1993). El almidón representa del 60 al 75% del peso total del grano, encontrándose principalmente en el endospermo (86 a 89%) y, en menor cantidad, en el germen y pericarpio (Véles, 2004). Este glucano está compuesto por dos polisacáridos muy similares (amilosa y amilopectina) y un componente menor denominado “amilosa ramificada”, la cual puede estar o no presente. La amilosa es un polímero lineal, mientras que la amilopectina es una molécula más grande y ramificada. La amilosa es una  $\alpha$ -D-glucana (1,4) compuesta por residuos de  $\alpha$ -D-glucosa unidos por enlaces  $\alpha$  (1,4) con un bajo número de ramificaciones cuya unidad repetitiva es la  $\alpha$ -maltosa. Su peso molecular varía entre 105 y 106 g/mol. Presenta una estructura helicoidal con átomos de  $H^+$  hacia el interior de la hélice y grupos  $OH^-$  hacia el

exterior, lo cual permite su entorno hidrofóbico. En el interior debido a la presencia de  $H^+$  puede ser capaz de incluir otras moléculas como ácidos grasos, hidrocarburos y yodo. Por otro lado la amilopectina es una molécula predominante en muchos de los almidones, es un polímero ramificado que es mucho más largo que la amilosa y a diferencia de esta es que las ramificaciones le confieren una forma de árbol. La amilopectina está compuesta de enlaces  $\alpha$  1,4 unidos con glucosa por enlaces ramificados  $\alpha$  1,6 localizados cada 15 a 25 unidades de glucosa. Se ha estimado que cerca del 4 a 6% de los enlaces dentro del promedio de los enlaces de amilopectina son  $\alpha$  1,6. El almidón del maíz comúnmente está compuesto de aproximadamente 25% amilosa y 75% amilopectina. Tanto la amilosa como la amilopectina no existen de manera libre, se encuentran como componentes discretos, agregados semicristalinos, llamados gránulos de almidón (Badui, 2006). Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a la disposición de su estructura y a la estabilidad que le confiere las múltiples interacciones de la amilosa y la amilopectina.

#### 5.3.1.1. Digestibilidad del almidón

La digestibilidad de almidón en cerdos inicia cuando la comida es mezclada con la amilasa salival secretada en la boca. Existen dos tipos dos carbohidrasas (Figura 2) capaces de digerir enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 presentes en el almidón. La primera de ellas es la  $\alpha$ -amilasa salival, que es una enzima ácido lábil, lo que provoca que sea desactivada por el bajo pH (2 a 4) del estómago y no pueda actuar significativamente durante la digestión de los carbohidratos (Bach y Jorgensen, 2001). La segunda es la  $\alpha$ -amilasa pancreática, que es secretada en el intestino delgado donde comienza digiriendo los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 del almidón, y junto con la isomaltasa, el producto final son oligosacáridos: maltosa, maltotriosa e isomaltosa ( $\alpha$ -dextrinas) límites. Enseguida estos oligosacáridos son degradados a glucosa por las oligosacaridasas que se encuentran en la membrana del borde de cepillo, estas oligosacaridasas, llamadas glucoamilasas (glicoproteínas) son capaces de remover enlaces simples de  $\alpha$ -1,4-glucosa pero su actividad acaba cuando llega al extremo terminal del polisacárido, donde hay glucosa ligada a enlaces  $\alpha$ -1,6 (Rooney y Pflugfelder, 1986). La enzima  $\alpha$ -dextrinasa es la única enzima capaz de separar enlaces  $\alpha$ -1,6 que sufrieron cambios anteriormente por las otras enzimas. Los oligosacáridos  $\alpha$ -1,4 de cadena corta (maltosa y maltotriosa), son transformados a glucosa por acción de la sucrosa. La glucosa final puede ser

transportada por acarreadores de glucosa con el uso de la bomba Na-K ATPasa, enseguida pasa a circulación portal, que consecuentemente distribuye la glucosa por la sangre a los diferentes órganos (Bach, 2011).

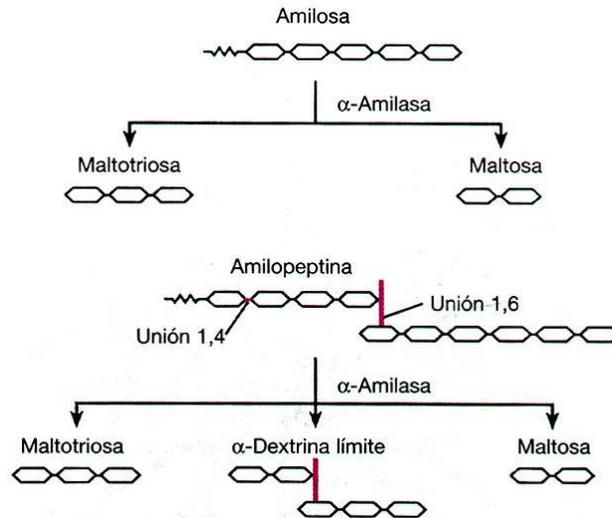


Figura 2. Productos de la digestión del almidón tras la exposición de la α-amilasa salival y pancreática

La tasa y grado de digestibilidad (Figura 3) dependerá de la cristalinidad natural de los gránulos de almidón o la fuente de almidón, la relación amilosa-amilopeptina y el tipo y grado de procesamiento del almidón (Chiba, 2012).

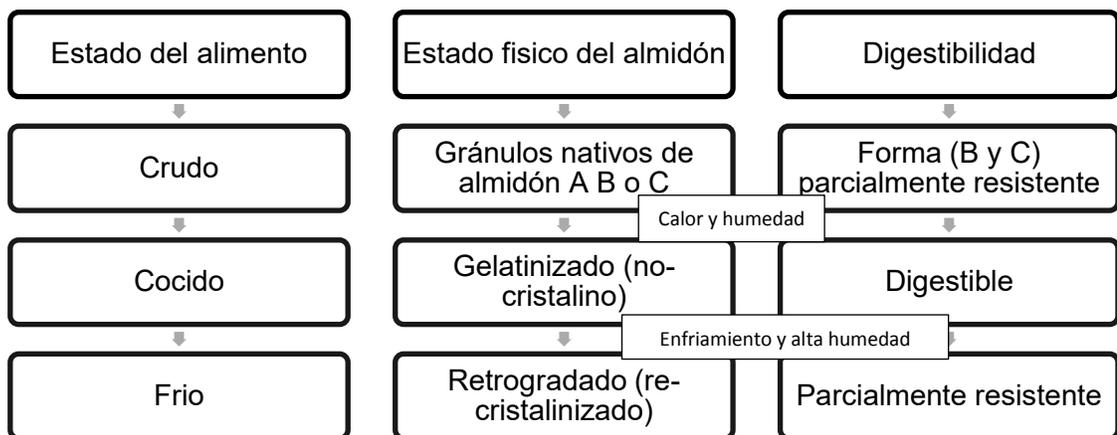


Figura 3. Digestibilidad del almidón en relación a su forma física y procesamiento.

### 5.3.1.2. Gelatinización del almidón

Los valores de digestibilidad de almidón en cerdos muestran que cuando este es sometido a procesos térmicos (peletizado, nixtamalización, extrusión) se vuelve más digestible. Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a su estructura altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes (amilosa y amilopectina). Cuando el almidón es calentado en presencia de agua, ocurre un fenómeno conocido como gelatinización, que es la formación de un “gel” (Elasson, 2007) y ocurre un colapso de las moléculas que se encuentran altamente ordenadas dentro el gránulo de almidón. En este proceso ocurren cambios irreversibles, tales como hinchamiento de los gránulos, la pérdida de birrefringencia y la solubilización del almidón. Debido a que los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, la gelatinización del almidón le confiere características de forma y textura diferentes necesarias para aplicaciones dentro de la industria, algunos procesos que involucran la gelatinización son el cocimiento térmico-alcálico, peletizado, extrusión, etc. El enfriamiento después del calentamiento con agua puede llevar a la formación de almidón retrogrado, que se traduce en la formación de cristales e incremento en la viscosidad que reducen la digestibilidad enzimática del almidón. En cuanto a los almidones pregelatinizados, estos son una forma de almidón modificado que se caracterizan por captar agua rápidamente a temperatura ambiente y formar pastas uniformes; además, como resultado del proceso de gelatinización, ocurren cambios dentro del grano en los que la hemicelulosa se convierte en una goma soluble, las pectinas aumentan su capacidad gelificante, parte de los lípidos del germen son saponificados, mejora la biodisponibilidad de la niacina y se desnaturalizan parte de las proteínas del grano.

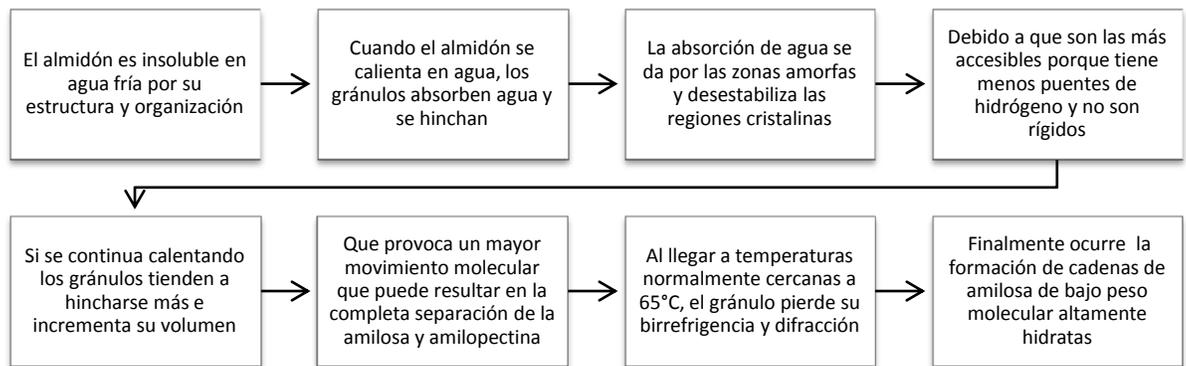


Figura 4. Descripción del proceso de gelatinización (adaptación Badui, 2006).

### 5.3.2. Proteínas

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano por orden de importancia. El contenido de proteína (cuadro 1) puede oscilar entre el 8 y 11% del peso del grano y la mayor parte de la proteína se encuentra concentrada en cuerpos subcelulares en el endospermo. Las proteínas de los granos de maíz están formadas por lo menos con cinco fracciones distintas (FAO, 1993). Estas proteínas han sido identificadas a través de diferentes reacciones químicas y clasificadas dependiendo de su solubilidad en distintas soluciones, entre estas proteínas encontramos a las albúminas (solubles en agua y soluciones salinas diluidas), glutelinas (solubles en ácidos o álcalis diluidos), globulinas (solubles en disoluciones salinas) y prolaminas (solubles en alcohol), que comúnmente son nombradas zeínas. En general, las proteínas del maíz son caracterizadas por altos niveles de zeínas y glutelinas, representando estas aproximadamente el 60 a 85% del total de la proteína (Walsh, 1937).

Las zeínas están localizadas principalmente en el endospermo y son extremadamente bajas en el contenido de lisina. Las glutelinas están en los cuerpos que comprenden la matriz proteica en el endospermo. En contraste, las proteínas en el germen son principalmente las albuminas y las globulinas (Santos *et al.*, 2014). Las zeínas son clasificadas de acuerdo al peso molecular como Alfa (14 kD), Beta (16 kD) y Delta (10 kD) zeínas. Estas zeínas contienen diferentes cantidades de aminoácidos, lo que diferenciará su digestibilidad y la organización de los cuerpos de proteína. El contenido de aminoácidos de las proteínas del maíz es similar al de otros cereales, los niveles de lisina y triptófano son bajos, e importantes cantidades de prolina, ácido glutámico y otros

aminoácidos no esenciales; por lo tanto, al reducir la cantidad de zeínas, incrementa el contenido de lisina y triptófano disponible y mejora el valor nutricional de las proteínas del maíz (Singh *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Solubilidad y contenido de las proteínas del maíz

| Tipo de proteína | Solubilidad | Grano entero | Endospermo | Germen |
|------------------|-------------|--------------|------------|--------|
| Albuminas        | Agua        | 8            | 4          | 30     |
| Globulinas       | Sal         | 9            | 4          | 30     |
| Glutelinas       | Álcali      | 40           | 39         | 25     |
| Zeínas           | Alcohol     | 39           | 47         | 5      |

Fuente: Cheryan y Shukla, (2001).

### 5.3.3. Lípidos

El maíz contiene 4% de extracto etéreo que se compone principalmente de triglicéridos que son altos en ácido oleico y linoleico. El maíz algunas veces es considerado una oleaginosa, debido a que se producen grandes cantidades de germen como co-producto del maíz durante la molienda húmeda y seca (Smith, 2004), además es una excelente fuente de ácidos grasos. El germen es la porción del grano caracterizada por su alto contenido de lípidos (33%) y el aceite del grano es distinguido porque es rico en ácidos grasos poliinsaturados (Singh *et al.*, 2014). Los ácidos grasos se encuentran en mayor proporción en el germen, conteniendo el 84% de los lípidos del grano y el 16% restante se encuentra en el endospermo (Véles, 2004).

## 5.4. Uso de tecnologías en los ingredientes utilizados para la elaboración de alimentos en cerdos

El aporte nutricional de los granos, parte de su composición tanto química como física. Ya que básicamente la proporción de almidón, germen, y proteínas de almacén, aportarán la energía que el animal podrá utilizar. Sin embargo, el pericarpio, una estructura con alta cantidad de fibra (Fibra cruda: 77.7 %) protege al grano de la acción digestiva (Bartolo-Pérez *et al.*, 1999). Componentes, como cascarillas y pericarpios tienen una pobre digestibilidad en animales como los cerdos, debido a la poca o nula actividad enzimática

durante su digestión, debido a esto son utilizados diferentes procesos, tanto físicos (molienda, mezclado, peletizado) como químicos (tratamiento térmico, extrusión, peletizado, nixtamalización) a los que son sometidas diferentes ingredientes utilizados en las dietas para cerdos, con el objetivo de disminuir el efecto de una pobre digestibilidad de la dieta completa (Gorrachategui, 2010; NRC, 2012).

#### 5.4.1. Molienda

El pericarpio es la parte donde se concentra la mayor cantidad de fibra y protege de la actividad enzimática al grano, entonces la molienda, se convierte en uno de los procesos básicos en la fabricación de alimentos al exponer los nutrientes a la actividad enzimática y lograr una reducción del tamaño de partícula, lo que incrementa la superficie de área debido a una mayor interacción con las enzimas digestivas que deriva en un incremento de la digestibilidad de energía y de nutrientes, además de mejorar la eficiencia del comportamiento productivo y favorecer el manejo de los animales y el mezclado de los ingredientes (Ohh *et al.*, 1983). Wondra *et al.*, (1995) reportaron que cuando se disminuye el tamaño de partícula del maíz de un molido grueso a un molido fino (1,000, 800, 600 y 400  $\mu\text{m}$ ) en dietas en harina para cerdos en crecimiento, la eficiencia alimenticia incrementa linealmente conforme el tamaño de partícula es reducido, sugiriendo una ventaja de 1.3% de eficiencia por cada 100  $\mu\text{m}$  que se reduce el tamaño de partícula. Sin embargo, deben tomarse consideraciones ya que proporcionar dietas en pelet con maíz molido a un tamaño de partícula menor a 400  $\mu\text{m}$  puede incrementar la presencia de úlceras (Wondra *et al.*, 1995). Goodband *et al.*, (2002) reportaron que, al reducir el tamaño de partícula en la molienda del maíz o sorgo de 1,100 a 700  $\mu\text{m}$  en dietas para cerdos, se mejora la conversión alimenticia hasta en un 5 %. Cabrera *et al.*, (1994) encontraron que el reducir el tamaño de partícula mejora la eficiencia de 0.290 hasta 0.307 kg. en cerdos de 54 a 120 kg. Wondra *et al.*, (2005) encontraron que la digestibilidad de energía metabolizable (EM) se maximiza de 1,000 a 400  $\mu\text{m}$  cuando es reducido el tamaño de partícula del maíz para dietas de cerdas gestantes (3339 vs 3745kcal, respectivamente).

#### 5.4.2. Mezclado

El objetivo principal del mezclado, es la distribución uniforme de todos los ingredientes en el alimento producido. Una mezcla uniforme aportará al animal una dieta balanceada,

asegurando el apropiado consumo de nutrientes y maximizará el comportamiento productivo (Groesbeck *et al.*, 2007). Existen diferentes diseños de mezcladoras, la más común es la de tornillos vertical, siguiéndole la de paletas horizontal y la de listones horizontal. Los tiempos sugeridos para el mezclado son generalmente cercanos a 15 minutos para una de tornillos vertical, de 6 a 7 para una de paletas horizontal y de 3 a 4 minutos para la de listones horizontal. Desde el punto de vista de manufactura de los alimentos, es importante durante la molienda el tiempo, electricidad y trabajo. El coeficiente de variación (CV) en la distribución de los ingredientes es un valor indicativo del adecuado mezclado, valores de 10-20% son aceptados (depende de la etapa de producción), se hacen principalmente pruebas con medicamentos, vitaminas y aminoácidos cristalinos para verificar el mezclado (Hancock y Behnke, 2001). En un experimento llevado a cabo por Traylor *et al.*, (1994) donde evaluaron la uniformidad de la dieta con diferentes tiempos de mezclado (0, 0.5, 2.0 y 4.0 min) y su efecto en el comportamiento productivo de lechones y cerdos de crecimiento a finalización y encontraron que al incrementar el tiempo de 0 a 0.5 min disminuyó el CV desde 106.5 a 28.4 y al llevarlo hasta 4 minutos el CV fue de 12.3 %, el comportamiento productivo de los lechones se incrementó linealmente conforme incrementó el tiempo de mezclado y en cerdos en crecimiento tuvo efecto cuando se aumentó de 0 a 0.5 min en el porcentaje de grasa, el cual se disminuyó conforme incrementó el tiempo de mezclado, sugiriendo que los lechones son más sensibles a las diferencias en el tiempo de mezclado que los cerdos en crecimiento.

#### 5.4.3. Procesos térmicos

Existen ingredientes que deben de ser sometidos previamente a procesos térmicos para incrementar la disponibilidad de nutrientes ya que favorecen la inactivación de compuestos antinutricionales como fitatos, fenoles, e incluso pueden favorecer la separación de componentes estructurales del grano (principalmente fibra) que son menos digestibles, la desnaturalización de las proteínas y la gelatinización parcial del almidón. El almidón, junto con las grasas, es la fuente principal energética en las dietas para cerdos. La estructura y el valor nutricional del almidón, tanto de las dietas como de los ingredientes pueden ser mejorados, al facilitar su degradación enzimática. En muchas dietas para cerdos, el almidón constituye la principal fuente de carbohidratos, lo que hace al almidón una fuente importante de energía en la dieta.

#### 5.4.3.1. Extrusión

La extrusión es una tecnología comúnmente utilizada en la elaboración de alimentos. Inicialmente esta tecnología se desarrolló para el transporte y manufactura de materiales, tales como masas y pastas. El principio de la extrusión es convertir los diferentes ingredientes que componen un alimento en productos terminados con una forma específica. Este proceso implica una serie de pasos para la manufactura de los alimentos, y en él se utilizan tanto energía térmica como presión. Los ingredientes se introducen en un extrusor (de uno o dos ejes), el cual está acondicionado previamente por la aplicación de líquidos y vapor en circunstancias de alta presión y temperatura, y los ingredientes salen de la cámara a través de una matriz donde se ejerce máxima presión. Hay autores (Vásquez-Lara *et al.*, 2010) que mencionan que durante este proceso las proteínas del maíz (zeínas) son liberadas de cuerpos proteicos formando polímeros viscoelásticos, lo cual le conferirá la capacidad de adquirir una forma física específica.

El maíz es uno de los ingredientes que comúnmente es sometido a extrusión, ya que, a pesar de ser un ingrediente de alta digestibilidad, su contenido de fibra provoca una alta variación en el comportamiento productivo y digestibilidad de los animales. Li *et al.*, 2010 midieron el efecto de la extrusión del maíz en la digestibilidad *in vitro* y encontraron que la digestibilidad de nutrientes, como MS, PC, almidón y FDN, y de EB incrementa al ser comparado con maíz que no se sometió a ningún tratamiento térmico, el efecto principal es en el almidón (0.798 vs 0.136kg). Sun *et al.*, 2006 reportaron que los coeficientes de digestibilidad de la cebada incrementaron cuando ésta fue sometida a extrusión (0.93 vs 0.99 kg) que concuerda con lo encontrado por Pettersson y Lindberg (1997) quienes reportaron valores muy similares.

#### 5.4.3.2. Peletizado

El peletizado es otro método muy común que consiste en convertir una mezcla de ingredientes finamente molidos en densos aglomerados de libre-flujo (pelet). Las razones por las cuales se utiliza este proceso son: mejorar el comportamiento productivo de los animales, ya que en primer lugar evita la segregación de componentes del alimento, se puede disminuir el desperdicio por pérdidas en polvo; reduce la selección de alimento; modifica la velocidad de paso en el tracto gastrointestinal; la destrucción de patógenos en el alimento por la acción de la temperatura, y facilita el manejo de la materia prima al

disminuir la polvosidad e incrementar la densidad aparente (volumen). Sin embargo, contribuye poco al “cocimiento” de los alimentos (debido a la proporción de los almidones gelatinizados).

Cuando el alimento es peletizado, la ganancia diaria de peso y la conversión alimenticia pueden incrementar 7.9% vs 7.7%, respectivamente, ya que disminuye el desperdicio de alimento en comparación con dietas en forma de harina e incrementa la digestibilidad debido a la ruptura que sufre el endospermo de la pared celular del grano durante el proceso (Graham *et al.*, 1989). Cerdos alimentados en forma de pelet fueron más eficientes (0.295, 0.293, 0.291 y 0.310 vs 0.301, 0.318, 0.319 y 0.332 kg, respectivamente) que aquellos alimentados con harina (Wondra *et al.*, 1995). Ball *et al.*, 2015 reportaron que la digestibilidad de la energía en cerdos en crecimiento mejoró cuando las dietas fueron peletizadas en relación a dietas en harina (82.6 vs 83.4 %).

#### 5.4.3.3. Nixtamalización

La nixtamalización es un proceso que está más enfocado a la alimentación humana; sin embargo, debido a las ventajas que el proceso le da al grano, se han hecho estudios enfocados en la alimentación animal (más específicamente, de cerdos). La nixtamalización es un proceso de hidrólisis termo-alkalina que se utiliza para la manufactura de algunos productos derivados del maíz, principalmente tortilla. Este proceso consiste en el cocimiento del maíz en agua con cal (hidróxido de calcio), remojando los granos, y se obtiene como resultando el nixtamal (maíz remojado) y el nejayote (líquido de remojo). Esta técnica permite suavizar el pericarpio y permite al endospermo absorber agua, lo que facilita la molienda (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004), este proceso remueve parcialmente dichas estructuras, lo cual puede variar, y en algunos de los casos el pericarpio puede ser agregado para mejorar el aspecto del producto (Gwirtz y García-Casal, 2014); estas modificaciones del pericarpio le conferirán propiedades mecánicas (flexibilidad y textura) a la masa y/o tortillas. El pericarpio representa la fuente de fibra del grano, por lo que resulta mejor que este solo sea degradado parcialmente y no totalmente (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010). La nixtamalización comprende cuatro pasos: 1) Cocimiento de los granos de maíz bajo condiciones alcalinas hasta que estos sean tiernos; 2) Remojar el maíz cocido en la solución (que contiene comúnmente algún álcali)

de cocción por varias horas (desde 6-14 h); 3) Lavado del maíz, y 4) Molienda del maíz remojado hasta alcanzar una masa suave no pegajosa.

Los cambios físico-químicos que resultan en la nixtamalización son: la difusión de agua y los iones de calcio dentro del grano, y la gelatinización del almidón. Durante la nixtamalización hay un incremento en la biodisponibilidad de nutrientes como: la niacina, debido a la pérdida de ácido nicotínico durante el proceso; el fósforo, por las pérdidas de ácido fítico; el calcio, debido a la adición de hidróxido de calcio el cual es absorbido durante la cocción del maíz, y la lisina, por la liberación de glutelinas (Bressani *et al.*, 2010). Los gránulos de almidón están cubiertos por proteínas para mantener la estructura del gránulo de almidón gelatinizado, y éstas pueden sufrir hidrólisis química por el tratamiento térmico y el medio alcalino. La hidrólisis de la unión peptídica modifica la digestibilidad y las propiedades funcionales de las proteínas, como la solubilidad, las propiedades emulsificantes, gelificantes, etc. A pH alcalino se fijan a las proteínas cationes metálicas y la fijación de  $\text{Na}^+$  aumenta la solubilidad de las proteínas, mientras que la fijación de  $\text{Ca}^{++}$  la disminuye por formación de puentes salinos (Lupano, 2013). Fernández-Muñoz *et al.*, (2006) evaluaron diferentes temperaturas de cocción del maíz, y encontraron que cuando el maíz se cose a temperaturas elevadas ( $92^{\circ}\text{C}$ ) ocurre una mayor difusión de calcio en el endospermo debido a una degradación mayor del pericarpio en comparación con las muestras cocidas a más baja temperatura ( $72^{\circ}\text{C}$ ), donde el pericarpio actúa como barrera impidiendo la difusión de los iones de calcio al interior del grano de maíz.

#### 5.4.3.3.1. Métodos similares al proceso original de nixtamalización.

Han sido propuestas tecnologías alterativas a la nixtamalización para producir harina de maíz, como son el secado en tambor, calefacción óhmica y en microondas, extrusión, nixtamalización ecológica, y los ultrasonidos de potencia; sin embargo, no son capaces de igualar el método de nixtamalización tradicional (Méndez *et al.*, 2014). La nixtamalización seca o ecológica, lleva el mismo proceso que la tradicional, pero, la cal es sustituida por sulfato de calcio u otras sales o ácidos débiles, ya que se busca evitar la producción de efluentes contaminantes como el nejayote, que, a diferencia del proceso tradicional, no es removido el pericarpio totalmente lo cual puede lograr mantener el contenido de fibra y

además el contenido de calcio puede no incrementar debido al tipo de sales utilizadas para el proceso (Santiago *et al.*, 2014).

La producción de harina instantánea se lleva a cabo mediante secado en tambor, donde se mezcla harina de maíz con agua en una proporción de 3:1, se añade 0.3% de cal tomando como base el peso de maíz y una vez que la mezcla está lista se pasa por un secador de doble tambor calentando con vapor a 15, 20 y 25 libras por pulgada cuadrada (1.05, 1.40 y 1.75 kg por cm<sup>2</sup>) a 93°, 99° y 104° C de temperatura superficial y a 2, 3 y 4 rpm (Letona y Bressani, 1977).

La nixtamalización con el uso de un extrusor es otro método en el cual se utiliza maíz crudo, cal y agua. Esta mezcla es procesada en un extrusor de bajo cizallamiento para producir masa fresca. Las ventajas del proceso no-convencional de extrusión continua para la producción de masa fresca son: la no producción de efluentes, menor tiempo de procesamiento, utiliza menor cantidad de agua durante el proceso, menor gasto de energía, gelatinización de almidones y por lo tanto una mayor cantidad de absorción de agua (Bressani, 2009).

Existen algunos estudios donde se han evaluado dietas con la inclusión de algún ingrediente o sub-producto del proceso de nixtamalización. Cid *et al.*, (1998) evaluaron el efecto en el comportamiento productivo de cerdos en crecimiento al sustituir una fuente de calcio con sólidos insolubles de nejayote y encontraron que el comportamiento productivo (CDA, GDP y la eficiencia) no se vieron afectadas al utilizar el nejayote en sustitución a la fuente de calcio.

## 5.5. Sistemas de alimentación en cerdos.

### 5.5.1. Alimentación húmeda

En la actualidad existen dos grandes grupos de tipos de alimentos utilizados para cerdos, alimentos húmedos y alimentos secos. Los alimentos secos son harinas, comprimidos (pellets) y extruidos, los alimentos húmedos son principalmente dietas líquidas y la alimentación en forma de pasta. Ambos tipos de dietas requieren de un sistema computarizado para poder asegurar la correcta dosificación de agua:alimento y asegurar la correcta saturación de la mezcla, lo que comúnmente va cambiando dependiendo de la fase y etapa de producción.

### 5.5.2. Alimentación líquida

La alimentación líquida consiste en la elaboración del alimento con el uso de subproductos, comúnmente líquidos, consiste básicamente en la mezcla de ingredientes en harina con agua y los subproductos, resultando en una solución o suspensión. Típicamente las dietas líquidas contienen de 20 a 30 % de MS (Shurson *et al.*, 2010) y la relación de agua va desde 1:15 a 1:40. Al mezclar el alimento con agua, bacterias ácido-lácticas y levaduras se produce ácido-láctico, ácido acético y etanol que reducen el pH del alimento, lo cual inhibe el crecimiento de patógenos, al tiempo que reduce el pH del estómago (usualmente 4.0 a 4.5) de los animales que lo consumen previniendo la proliferación de patógenos (principalmente coliformes) (Missotten *et al.*, 2015) y mejora la actividad proteolítica del estómago optimizando la digestión de las proteínas (Radecki *et al.*, 1988). Entre las ventajas de los sistemas de alimentación líquida es que es un sistema automático, que facilita la dosificación y asegura la proporción de agua y alimento en la cantidad correcta (Lawlor *et al.*, 2002) disminuyendo el desperdicio de alimento.

#### 5.5.2.1. Estudios con alimentación líquida en cerdos

Hay estudios que reportaron que la alimentación líquida estimula el consumo de alimento en animales destetados e incrementa la tasa de crecimiento ( $12.3 \pm 9.4\%$ ) comparado con alimentación seca. Lawlor *et al.*, (2002) encontraron que el consumo incrementó cuando cerdos en crecimiento fueron alimentados con una dieta líquida 722 vs 852 g y reflejaron una mejor ganancia de peso 1309 vs 1530 g y por consecuencia se mejoró la eficiencia que aquellos alimentados con pellet. Sin embargo Canibe y Jensen (2003), encontraron que la eficiencia fue similar cuando se alimentó con dietas líquidas vs secas ya que la fermentación puede empezar desde el momento en que el agua y el alimento son mezclados, y esto resulta en un diferente grado de fermentación lo que da al alimento diferentes características y una capacidad diferente de ser digerido.

#### 5.5.3. Alimentación en forma de pasta

El alimento en forma de pasta es un alimento elaborado con harina nixtamalizada que contiene almidón pre-gelatinizado. Consiste en la mezcla del alimento en forma de harina mezclada con agua en una relación agua:alimento  $>1.5:1$  kg hasta asegurar la saturación de la mezcla (Hogberg *et al.*, 1981). Las características con las que debe cumplir la harina, son las siguientes: humedad inferior al 11% y tamaño de partícula al menos 75%

inferior a 0.250 mm, ya que esto favorecerá las propiedades físico-mecánicas de la pasta, ya que esta debe de cumplir con propiedades que le darán la textura y fluidez en el comedero (Chávez, comunicación personal). En la nixtamalización durante el calentamiento, el grano absorbe agua y hace que los gránulos de almidón pierdan su estructura cristalina, pero al ser enfriados se forma lo que se conoce como almidón retrogrado que hace que recupere la forma cristalina de los gránulos de almidón, sin embargo conforme se extiende el tratamiento térmico el gránulo de almidón crece y va aumentando la viscosidad de la solución formando una pasta (consistencia blanda, espesa y suave). La longitud de las cadenas de amilosa es el principal determinante de si la gelificación o precipitación se produce en este medio acuoso (Dintzis y Bagley, 1995). Los cambios producidos sobre la estructura del almidón debido a la gelatinización, van a determinar las propiedades de hidratación de la harina y la proporción de sólidos dispersables y gránulos. Luego de este proceso, los granos son deshidratados para poder obtener esta harina y pueden dispersarse en agua fría sin la necesidad de calor.

Se conoce como pasta a los alimentos preparados a partir de una masa cuya composición es la mezcla de harina y agua, lo que químicamente se conoce como suspensión, que provoca una dispersión con comportamiento no newtoniano, debido a que las fuerzas de interacción entre partículas (Hogberg *et al.*, 1981). Estos enlaces intermoleculares e interacciones intermoleculares que se forman pueden originarse a través de enlaces covalentes, hidrogeno e hidrofóbicos. Los componentes mayores que van a determinar esto son las proteínas, almidones y lípidos. Las propiedades físicas importantes de la masa son: viscosidad y flujo de la dispersión, que son de importancia práctica en la formulación de alimentos. La viscosidad de un fluido se define como la fricción interna o su resistencia al flujo. A medida que la concentración de la dispersión aumenta, la viscosidad va aumentando, al principio de manera lineal y luego, a partir de una cierta concentración crítica, el incremento es de mayor orden, el cual depende del tamaño y forma de las partículas. La viscosidad está dada por la las propiedades hidrodinámicas de sus componentes, por ejemplo, el tamaño y la forma de la partículas. Estas a su vez son afectadas por el pH, origen del almidón y los tratamientos durante el procesamiento, que alteran la conformación, la estructura, el grado de agregación, la hidratación y el hinchamiento de acuerdo a sus propiedades físicas (Dintzis y Bagley, 1995).

#### 5.5.3.1. Estudios con alimentación en forma de pasta en cerdos.

El uso de dietas en forma de pasta para cerdos en crecimiento con granos de maíz cocido alcalinamente mejoró la GDP en un 13% comparada con una dieta con maíz convencional en forma de harina. Este efecto fue atribuido a que con la dieta de pasta disminuyó el desperdicio de alimento, lo que se vio favorecido al haber utilizado los comederos adecuados que permiten el flujo correcto del alimento que lo dará el ángulo del comedero y una adecuada textura (con las características anteriormente mencionadas), lo que permite que el animal consuma con mayor rapidez disminuyendo el desperdicio del alimento (Chávez *et al.*, 2011).

Teague, 1970 condujeron diferentes experimentos donde evaluaron el efecto en el comportamiento productivo de cerdos alimentados en forma de pasta contra un alimento en harina en forma seca en cerdos en crecimiento, a partir de 30 kg de peso, y encontraron que la ganancia diaria de peso fue 10-15% superior para la dieta húmeda que la dieta en forma seca. Sin embargo, resultados demuestran que al proporcionar una dieta en forma de pasta en cerdos de 2 a 10 semanas de edad no hay efecto como el que se ha observado en cerdos en crecimiento, ya que no se manifestó ninguna ventaja cuando se comparó con una dieta seca (Shields *et al.*, 1990).

## **VI. Material y métodos**

### 6.1. Experimento 1.

#### 6.1.1. Capacidad de retención de agua.

Como un parámetro importante para medir la calidad de la pasta elaborada se juzgó que la capacidad de retención de agua fuera un parámetro fundamental en la decisión del alimento preparado para su consumo final, ya que si el agua agregada no es suficiente la calidad de la pasta se verá modificada. Si el agua agregada es excesiva se puede favorecer la fuga de nutrientes por lixiviado. Por otro lado, si el agua agregada no es adecuada y solo una parte del alimento puede retenerla, se impedirá que la mezcla sea homogénea lo que podría alterar el consumo voluntario de alimento, originando la selección del mismo y favorecer desperdicios.

Para la obtención de la capacidad de retención de agua (CRA) se utilizó el método de filtración modificado por Makinde y Sonaiya (2007), que consistió en la preparación de pasta al añadir diferentes cantidades de agua al alimento. Las mediciones del CRA se hicieron en cada una de las tres fases de alimentación (3 fases). El procedimiento fue el siguiente: 1) Se pesó una cantidad constante de alimento (0.250 kg), utilizando una probeta se midió la cantidad de agua adicionada en un recipiente con una capacidad de tres litros. 2) Una vez pesados el alimento y el agua, se siguió el proceso de adición y mezclado del alimento como se mencionó anteriormente. 3) Una vez mezclado el alimento se dejó reposar la mezcla por 10 minutos en una criba No. 125, bajo la cual se colocó una charola para captar el agua filtrada. Se tuvieron 6 repeticiones de 8 niveles de dilución por la cantidad de agua añadida y el punto de máxima retención de agua se calculó con técnicas de regresión a fin de distinguir el punto de inflexión de la curva. 4) Se pesó el alimento remanente y el agua filtrada para medir por diferencia la pérdida de agua.

#### 6.1.2. Tamaño de partícula.

Para la determinación de la media de tamaño de partícula del maíz, se utilizó el método descrito por ASAE (2008). De las muestras de ambos maíces (Maíz molido y MHA), se tomó una alícuota de 100 g de cada grano, y se colocó en la parte superior de las cribas (US tamiz # 50, 70, 100, 140, 200, 270 y una charola metálica), las cuales fueron acomodadas dependiendo del tamaño de abertura de la malla, comenzando desde la más

grande hasta la más pequeña. Todas las cribas fueron colocadas en una tamizadora por 10 minutos. El material obtenido en cada una de las cribas fue pesado y registrado para los cálculos de tamaño de partícula. Este procedimiento se realizó tres veces con cada muestra de maíz. Con esta información se realizaron los cálculos para la media de tamaño de partícula ( $d_{gw}$ ) y una vez obtenido este valor se calculó la desviación estándar ( $S_{gw}$ ), superficie de área ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) y cantidad de partículas por gramo ( $\text{No.} \cdot \text{g}^{-1}$ ).

## 6.2. Experimento 2.

### 6.2.1. Sitio experimental y animales.

El experimento se realizó en el área de jaulas individuales (superficie efectiva  $2.16 \text{ m}^2$ ) del CENID-Fisiología, INIFAP, situado en el municipio de Colón, Querétaro, México ( $20^\circ 41' 42.44'' \text{N}$  y  $100^\circ 100' 54.68'' \text{O}$  y  $1968 \text{ msnm}$ ). En los meses del experimento (diciembre a febrero) el rango promedio de las temperaturas diarias fue de  $6.2$  a  $25.2 \text{ }^\circ\text{C}$ . De una población de 120 cerdos de la misma línea genética (Fertilis 20 (hembras) x G Performance (macho); Genetiporc®) y edad, manejados convencionalmente hasta los 70 días de edad, se seleccionaron los 48 cerdos (24 hembras y 24 machos) más homogéneos para formar las unidades experimentales. Los cerdos fueron movidos a las jaulas individuales 14 días antes de comenzar el experimento con fines de adaptación. El peso inicial promedio a los 84 días de edad fue de  $46.3 \pm 3.05 \text{ kg}$ . Conforme a un Diseño Completamente al Azar; la aleatorización de los cerdos a los tratamientos y jaulas se hizo con base a grupos formados por camada de origen y el peso inicial; el sexo se incluyó al modelo como factor con lo que se pudo indagar los efectos de tratamiento y su posible interacción con el sexo (particularmente capacidad de consumo). Para lo que el modelo estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_j + \beta_k + (\alpha\beta)_{jk} + e_{ijk}$$

Dónde:

$Y_{ijk}$  = variable de respuesta

$\mu$  = media general

$\alpha_j$  = efecto del j nivel del factor a

$\beta_k$  = efecto del k nivel del factor b

$e_{ijk}$  = error experimental

### 6.2.2. *Tratamientos y elaboración de las dietas*

Los tratamientos se establecieron para evaluar la respuesta al alimento en forma de pasta por lo que fue necesaria la inclusión de dos controles, el primero fue un alimento elaborado con grano de maíz convencional (Control), sin un proceso más allá de la molienda, como se trataron todos los granos; el segundo fue un alimento ofrecido en forma de harina (MHAH) en el que se incluyó el grano de maíz previamente sujeto a una hidrólisis parcialmente alcalina a nivel industrial (Optimasa, Cargill®) y finalmente con la misma formulación, usando el alimento fabricado con grano de maíz parcialmente hidrolizado, el alimento se ofreció a los cerdos en forma de pasta (MHAP).

Los tratamientos se aplicaron para una misma fórmula en tres fases de alimentación en donde la densidad de nutrientes fue estimada para la población de la granja experimental, misma que se validó con las rutinas del NRC (2012). Los ingredientes mayores de las dietas fueron maíz blanco, maíz blanco parcialmente hidrolizado en álcali, pasta de canola y pasta de soya de un mismo lote, el cual fue analizado previo a la formulación de las dietas a fin de calcular el aporte de aminoácidos digestibles (Digestibilidad Ileal Estandarizada DIE), energía neta y fósforo digestible.

A las muestras de heces y de alimento se les determinó materia seca (MS), cenizas, proteína cruda (PC) (AOAC, 2007) y almidón (AACC, 2000). El calor de combustión de las muestras se obtuvo con una bomba calorimétrica (PARR instruments, modelo 1266). El contenido de calcio (Ca) y fósforo (P) se obtuvo por espectrofotometría de inyección de flujo (Thermo Scientific iCAP 6000 Series ICP apparatus). La formulación de las dietas se hizo mediante programación lineal a costo mínimo a la Energía Neta, los aminoácidos digestibles (respetando un perfil de proteína ideal) calcio total y fósforo digestible.

Se analizó la composición de los alimentos ofrecidos a los cerdos, tomando una muestra de cada bulto antes de alimentar a los animales, muestras que se mezclaron y homogeneizaron para analizar la composición promedio de los alimentos ofrecidos. En el cuadro 2 se presenta un resumen de la composición bromatológica de estos ingredientes.

Cuadro 2. Composición química de los ingredientes (%) utilizados para la elaboración de las dietas. Ajustados al 90% MS.

| Variable    | Maíz molido   | Maíz parcialmente hidrolizado | Pasta de soya | Pasta de canola | N  |
|-------------|---------------|-------------------------------|---------------|-----------------|----|
| PC, %       | 8.91 ± 0.150  | 8.88 ± 0.005                  | 50.56 ± 0.140 | 39.80 ± 0.040   | 6  |
| EB, Mcal/kg | 4.58 ± 0.150  | 4.44 ± 0.005                  | 4.60 ± 0.240  | 4.66 ± 0.001    | 6  |
| Cenizas, %  | 1.53 ± 0.010  | 1.50 ± 0.010                  | 9.80 ± 0.070  | 9.14 ± 0.070    | 6  |
| Calcio, %   | 0.15 ± 0.010  | 0.06 ± 0.040                  | 1.68 ± 0.150  | 0.64 ± 0.050    | 12 |
| Fosforo, %  | 0.23 ± 0.020  | 0.19 ± 0.010                  | 0.61 ± 0.050  | 0.75 ± 0.070    | 12 |
| FDA, %      | 2.11 ± 0.677  | 3.46 ± 0.916                  | 7.71 ± 0.040  | 18.04 ± 0.493   | 6  |
| Almidón, %  | 69.80 ± 1.980 | 77.40 ± 1.680                 | ND*           | ND*             | 6  |
| AG**, %     | 8.01 ± 0.100  | 29.67 ± 0.450                 | ND*           | ND*             | 6  |

\*ND= No Determinado. \*\*AG= Almidón gelatinizado

En el cuadro 3 se muestra la composición de cada una de las dietas utilizadas en las diferentes fases de alimentación del experimento, así como la composición calculada de nutrientes de las mismas. La identidad de composición de las dos fuentes de maíz (hidrolizado y solo molido) permitió que la composición de las dietas fuera la misma para los dos tratamientos.

La melaza de caña se incluyó en las dietas como un aditivo aglutinante, el ácido benzoico como conservador de los alimentos y se usó tilosina solamente durante la primera fase de alimentación para la prevención de enteritis proliferativa.

Diariamente se elaboraba la pasta cumpliendo con la relación de agua ya establecida, se pesaba la cantidad de agua correspondiente y el alimento a ofrecer. El alimento se añadió lentamente al agua mientras se revolvía el mismo y después de aproximadamente 30 minutos era ofrecido a los animales. En un principio esta mezcla se realizaba individualmente para cada animal, sin embargo, debido a la variación en la elaboración (duración y forma de mezclado), y para evitar diferencias en la consistencia se realizó en dos contenedores de plástico con capacidad de 40 litros y ahí se hacía la mezcla que se

ofrecía en cada comida a todos los animales con el mismo procedimiento ya descrito anteriormente.

Cuadro 3. Composición y análisis calculado de las dietas experimentales.

| Ingrediente, kg                                    | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|--|--------|--------|--------|
| Maíz <sup>a</sup>                                  | 605.50 | 686.30 | 772.00 |
| Soya, Pasta  | 232.60 | 169.00 | 87.00  |
| Canola, Pasta                                      | 80.00  | 80.00  | 80.00  |
| Aceite de Soya                                     | 27.00  | 7.00   | ---    |
| Melaza de Caña                                     | 25.00  | 40.00  | 40.00  |
| Fosfato de Calcio (mono y dicálcico)               | 10.10  | 4.50   | 4.45   |
| Carbonato de Calcio                                | 7.26   | 1.98   | 4.60   |
| Ácido Benzoico (Vevovitall, DSM®)                  | 4.00   | 3.00   | 2.60   |
| Sal, yodada  | 3.60   | 3.60   | 3.60   |
| Vitaminas, pmx <sup>b</sup>                        | 2.20   | 2.00   | 2.00   |
| Minerales traza <sup>c</sup>                       | 0.90   | 0.80   | 0.80   |
| L-Lsina HCl  | 1.27   | 1.46   | 2.60   |
| Tilosina (Tylan fosfato premezcla, ELANCO México®) | 0.50   | -      | -      |
| L-Treonina   | 0.07   | 0.34   | 0.80   |
| L-Triptófano                                       | -      | 0.02   | 0.15   |
| Total  | 1000.0 | 1000.0 | 1000.0 |
| <b>Composición calculada</b>                       |        |        |        |
| EM, (Mcal/kg)                                      | 3.30   | 3.24   | 3.21   |
| EN, (Mcal/kg)                                      | 2.37   | 2.34   | 2.36   |
| Proteína Cruda %                                   | 19.20  | 17.00  | 14.00  |
| Lisina Digestible %                                | 0.90   | 0.78   | 0.69   |
| Calcio, %  | 0.63   | 0.53   | 0.50   |
| Fósforo total, %                                   | 0.61   | 0.45   | 0.43   |
| Fósforo digestible, %                              | 0.29   | 0.17   | 0.16   |

<sup>a</sup>Maíz: maíz blanco parcialmente hidrolizado o maíz blanco molido.

<sup>b</sup>La premezcla de vitaminas aporta las siguientes cantidades por kg: Vitamina A, 4,250 UI·g<sup>-1</sup>; Vitamina D3, 800 UI·g<sup>-1</sup>; Vitamina E, 32 UI·g<sup>-1</sup>; Menadione, 1.5 g·kg<sup>-1</sup>; Biotina, 120 g·kg<sup>-1</sup>; Cianocobalamina, 16 g·kg<sup>-1</sup>; Colina, 250 g·kg<sup>-1</sup>; Ácido fólico, 800 g·kg<sup>-1</sup>; Niacina, 15 g·kg<sup>-1</sup>; Ácido pantoténico 13 g·kg<sup>-1</sup>; Piridoxina 2.5 g·kg<sup>-1</sup>; Riboflavina 5 g·kg<sup>-1</sup>; Tiamina, 1.25 g·kg<sup>-1</sup>.

<sup>c</sup>La premezcla de minerales traza aporta las siguientes cantidades por kg: Co, 0.60 mg; Cu, 14 mg; Fe, 100 mg; I, 0.80 mg; Mn, 40 mg; Se, 0.25 mg; Zn, 120 mg.

Para el cálculo del agua a utilizar en función del alimento ofrecido se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Kilogramos de agua} = (\text{Cantidad de agua por kg de alimento, relación agua:alimento}) * (\text{kg de alimento a preparar})$$

Dónde kilogramos de agua es la cantidad de agua a utilizar para realizar la mezcla, cantidad de agua por kg de alimento es la cantidad de agua, establecida por la relación agua:alimento, previamente y Kg de alimento son los kilogramos de alimento ofrecido.

### *Manejo y alimentación de los animales*

El alimento fue ofrecido dos veces por día (0800 y 1800h), a saciedad y diariamente se registró el alimento ofrecido y se retiraron los sobrantes al día siguiente para calcular el consumo por diferencia.

El alimento en pasta se preparó diariamente, antes de cada comida, mezclando la proporción de agua previamente determinada. Para ello se realizaron para cada fase de alimentación un promedio de 60 ensayos en donde se tuvieron 10 repeticiones de 6 proporciones de agua para encontrar el punto de máxima retención de agua con la consistencia deseada de la pasta.

Los cerdos se pesaron al inicio y cada 3 semanas, al final de cada fase de alimentación, al tiempo se realizaron mediciones con un equipo de ultrasonido en tiempo real (ALOKA SSD-500), para registrar la profundidad de la grasa y del músculo largo dorsal a fin de estimar el crecimiento del tejido magro libre de grasa por fase de alimentación y el mérito de las canales al final del ensayo. Las mediciones se tomaron en el punto P2 el cual se localiza a 6.5 cm al nivel de la décima y la última costilla.

Para obtener el valor de Profundidad de grasa (PG) y Profundidad de músculo (PM) se promediaron los valores tomados en la décima y la última costilla.

Para calcular los cortes primarios y el tejido magro libre de grasa se usaron las siguientes ecuaciones:

Tejido magro libre de grasa:  $1.19 + (0.36 * \text{Peso Vivo o Peso en Pie}) + (-2 * \text{PG}10) + (-1.19 * \text{PGU}) + (1.85 * \text{PM}10)$  (Cuarón, 2013).

Dónde PG10, es la profundidad de grasa a la altura de la décima costilla. PGU, es la profundidad de grasa a la altura de la última costilla. PM10, es la profundidad de músculo a la altura de la décima costilla. PMU, es la profundidad de músculo a la altura de la última costilla (Cisneros et al., 1996).

Cortes primarios:  $2.6351 + (\text{Peso canal caliente, kg} \times 0.3575) - (\text{Profundidad de grasa dorsal, cm} \times 5.1093) + (\text{Profundidad de músculo, cm} \times 1.9014)$ ,  $R^2 = 0.68$  (Cisneros et al., 1996)

Al final de las fases 1 y 2 de alimentación se ofreció dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en la relación de 0.3% en la dieta (durante el período de colección de las heces, el alimento se ofreció al 90% del consumo máximo observado en la semana previa.) y 14 días después de iniciadas las fases de alimentación, en un período de 5d se tomaron muestras de heces, tiempo en el que se tomó una muestra que fue procesada inmediatamente después de cada colecta; las heces fueron secadas en una estufa de aire forzado ( $56^\circ\text{C}$ ); una vez secas, se pesaron y se molieron en un equipo Thomas Wiley hasta pasar por una criba de 1 mm. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico, se tomó una alícuota y se almacenó en frascos de plástico en un sitio fresco y oscuro para analizar el contenido de energía, proteína, calcio y fósforo con los mismos métodos con los que se determinaron las dietas y el contenido de titanio por el método establecido por Myers *et al.*, (2004). Para calcular la concentración de nutriente por diferencia con la siguiente ecuación.

El cálculo de los coeficientes de digestibilidad aparente a nivel fecal (CDAf) de la materia seca, proteína, energía, calcio y fósforo se realizaron con la siguiente ecuación (Fan et al., 1994):

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

Dónde CDAf es el coeficiente de digestibilidad aparente a nivel fecal 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 las heces ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de MS), AD es la concentración del nutrimento en la dieta ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de MS), IF es la concentración del indicador en las heces ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de MS). Se calculó la eficiencia energética partir de la ED calculada con los coeficientes de digestibilidad obtenidos de CDAf, con una eficiencia de 0.963 para EM y de 0.820 EN (NRC, 2012).

### 6.2.3. *Comportamiento durante el consumo*

Los 48 cerdos fueron observados de acuerdo al método empleado por Nannoni *et al.*, 2013 durante un día (0700 a 0500h), en 4 oportunidades durante la etapa intermedia de alimentación para evaluar el comportamiento del consumo, determinando el número de comidas (NC), duración de las comidas (DC), tiempo de ocupación en el comedero por día (TOC) y el número de visitas al bebedero (VB).

### 6.2.4. *Análisis estadístico*

Los datos se analizaron como un Diseño Completamente al Azar, en el que el efecto del sexo se distinguió con una aproximación factorial con los procedimientos GLM y MIXED del paquete estadístico SAS (v. 9.2)®. Los resultados se presentan como las medias de mínimos cuadrados, calculadas con la opción LSMEANS y se presentan como los resultados acumulados al final de cada fase de alimentación, de tal forma que los resultados que se presentan en el cuadro, como los acumulados al final de la tercera fase de alimentación, son equivalentes a los resultados finales o respuesta acumulada a todos los tratamientos. Se evitó una comparación múltiple entre medias descansando en la interpretación de los contrastes planeados. Los contrastes fueron los siguientes: 1) Harina (maíz hidrolizado) vs. Pasta (maíz hidrolizado) y 2) Harina (maíz hidrolizado) y Pasta (maíz hidrolizado) vs. Harina (maíz molido).

## VII. Resultados y Discusión

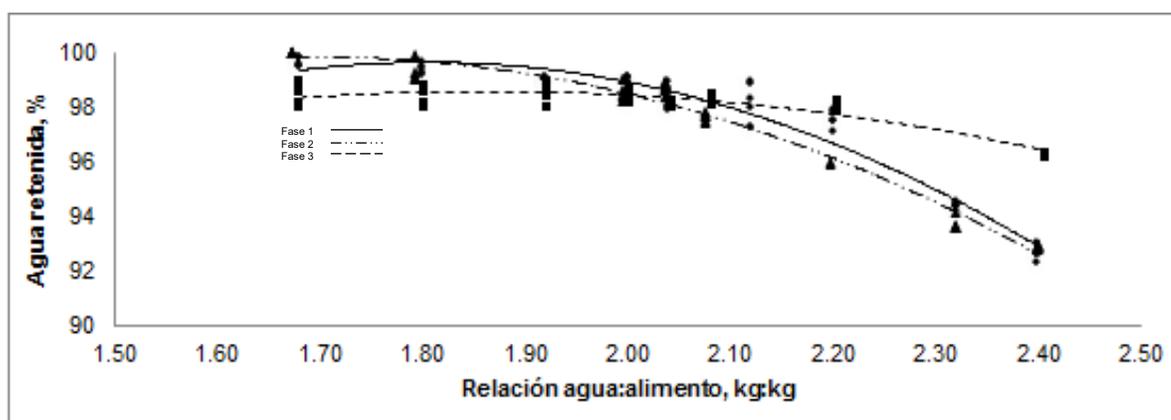
### 7.1. Experimento 1.

#### 7.1.1. Relación agua:alimento calculada con aerómetro

Para la fabricación del alimento en pasta se usaron proporciones de agua:alimento (kg:kg) de: 2.0:1(fase 1), 2.1:1 (fase 2) y, 2.2:1 (fase 3). La relación se incrementó de acuerdo al contenido de maíz parcialmente hidrolizado en las dietas que fue de 60.55 (Fase 1), 68.63 (Fase 2) y 77.20 (Fase 3) por ciento.

#### 7.1.2. Capacidad de retención de agua.

Para el alimento fase 1, se encontró que el punto de inflexión de la curva que describe la capacidad de retención de agua (CRA), en función de la relación agua:alimento (Gráfica 1), corresponde a una relación de 1.7:1 (kg:kg). De acuerdo a la Gráfica 1 al usar relaciones menores a 1.7 no se logra aprovechar la máxima CRA de la dieta y a su vez al usar relaciones mayores a 1.7 se rebasa la CRA.



Gráfica 1. Capacidad de retención de agua de los alimentos fase 1, 2 y 3.

El cambio de la proporción de agua conforme a la relación agua:alimento, se modificó cuando se agregó mayor cantidad de maíz en la fase 2 de alimentación (68.63%), lo cual se muestra en la Gráfica 1; el punto donde se detectó que el alimento pudiese retener mayor cantidad de agua fue a partir de la proporción de 1.8 (con la adición de 450ml de agua), que fue el punto de inflexión de la curva, que comparado con la fase 1 fue con mayor cantidad de agua que llegó al punto de máxima capacidad de retención de agua. Se utilizó una relación 2.1:1 porque seguía teniendo menos del 2% del agua no retenida.

En la fase 3 de alimentación la relación fue en 1.86:1 donde ocurre un cambio en la pendiente de la recta, y se encontró el punto de inflexión. El comportamiento de la recta para la fase 3, es diferente que las dos fases anteriores, ya que el cambio más fuerte se puede observar luego de relación 2.2:1 que es cuando se añadieron 550 ml de agua demostrando una vez más la influencia que tiene el maíz en la cantidad de agua a adicionar para la preparación del alimento (Gráfica 1).

Cuadro 4. Ecuaciones de predicción y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la capacidad de retención de agua por fase de alimentación.

| Fase | Ecuación                        | $R^2$ |
|------|---------------------------------|-------|
| 1    | $-15.477x^2 + 52.775x + 54.88$  | 0.978 |
| 2    | $-19.049x^2 + 68.766x + 37.613$ | 0.949 |
| 3    | $-7.3843x^2 + 27.484x + 73.008$ | 0.812 |

Se decidió trabajar, en las tres dietas, con las relaciones donde la mínima pérdida de agua podía ser usada como un control que asegure la saturación de agua de la mezcla para evitar problemas de textura y manejo en el comedero debido a la variación que pudiera existir en la preparación del alimento, y fue donde la mayoría de las relaciones se encontraron en un 98% de agua retenida. Los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para la ecuación de las tres gráficas indican que son confiables para predecir la CRA a fin de generar condiciones estandarizadas de operación como se hizo en este experimento. La  $R^2$  para la Fase 1, Fase 2 y Fase 3 fue de 0.978, 0.949 y 0.812, respectivamente (cuadro 4). Anteriormente la cantidad de agua a adicionar se verificó con el aerómetro, la cual es una observación que sirvió para poder revisar periódicamente que la calidad de la pasta fuera la adecuada. Una vez que se encontró el punto de inflexión de la curva a partir de la medición de CRA sirvió para corroborar esta información obtenida con el aerómetro.

La capacidad de retención de agua del maíz estuvo directamente relacionada con el porcentaje de inclusión de MHA de cada una de las fases de alimentación, ya que conforme la cantidad de maíz incrementó, también la cantidad de agua necesaria para la preparación del alimento. La capacidad de la harina de retener agua está proporcionalmente afectada por el contenido de polisacáridos solubles del grano (baja

concentración) y en este caso incrementó la cantidad de almidón gelatinizado en el MHA que le confiere una mayor concentración de carbohidratos solubles. De acuerdo con Witczak *et al.*, (2015) la calidad del almidón (cantidad de almidones solubles), es la que determina las propiedades mecánicas específicas que permiten que se unan sus moléculas, formando una estructura de red continua viscoelástica. Esto en conjunto con la gran superficie que tiene el endospermo de cereales finamente molidos (aprox. 200  $\mu\text{m}$ ) permite la absorción de grandes cantidades de agua, que en combinación se forma sustancias hidrocoloides actuando como un pegamento para las partículas que forman la harina y les permite crear esta estructura uniforme llamada masa. Por cuestión de calidad de este tipo de alimentos (pasta) es muy importante asegurar la saturación de la mezcla del alimento con el agua, que hace muy importante la tasa de dilución, porque puede verse afectada la disponibilidad de los nutrientes si ocurre sedimentación de la mezcla (separación de fase líquida y sólida) y decantación de nutrientes (Lizardo, 2003). Por otro lado, la relación agua: alimento de la pasta que se determinó en este estudio estuvo dentro de los valores admisibles para dietas húmedas en cerdos, ya que cuando se tienen relaciones agua: alimento tan altas como >4:1 el comportamiento productivo de cerdos en crecimiento se afecta negativamente (Choct *et al.*, 2004).

#### 7.1.3. *Tamaño de partícula.*

Los resultados de tamaño de partícula de los dos granos de maíz evaluados (Cuadro 5), indican que el grano de MHA tiene el mayor número de partículas por gramo ( $4321.80 \text{ g}^{-1}$ ), en relación al maíz sin procesar más allá de la molienda ( $2243.91 \text{ g}^{-1}$ ), así mismo la superficie de área fue mayor ( $4321.80 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) y la media de tamaño de partícula fue menor para MHA que para el maíz molido ( $712.20$  vs  $1085.70 \mu\text{m}$ , respectivamente), lo que hace sentido, debido a que coincide con la mayor superficie de área para el MHA. El tamaño de partícula es importante para la elaboración del alimento en pasta ya que es uno de los factores que afectará la capacidad de retención de agua de la mezcla determinando la calidad de la masa y por lo tanto la textura de la misma. Missotten *et al.*, (2015) Mencionan que las partículas más grandes tienen una superficie de área más pequeña, que les confiere una baja capacidad de retención de agua disminuyendo su capacidad de formar una mezcla más uniforme y con características físicas que permitan su manejo, y en el caso de los cerdos se vuelve importante ya que la forma física debe de facilitar el manejo en el comedero (facilidad de resbalar dentro del comedero y no quede

pegado en las paredes del mismo) para lograr su uso eficiente y así asegurar su consumo.

Cuadro 5. Media de tamaño de partícula ( $d_{gw}$   $\mu\text{m}$ ) para maíz molido y maíz parcialmente hidrolizado (MHA).

| Variable   | Maíz molido | MHA     |
|--|-------------|---------|
| Media de tamaño de partícula ( $d_{gw}$ ), $\mu\text{m}$ | 1085.70     | 712.20  |
| Desviación estándar del tamaño de partícula              | 1.41        | 1.43    |
| Partículas por gramo, $\text{No.} \cdot \text{g}^{-1}$   | 2243.91     | 4321.80 |
| Superficie de área, $\text{cm}^2/\text{g}$               | 97.80       | 137.57  |

## 7.2. Experimento 2.

### 7.2.1. Composición de las dietas.

En el cuadro 6 se muestra la composición química de las dietas utilizadas en el experimento, donde se observa que el contenido de almidón fue mayor en las dietas que contenían MHA, siendo para la fase 1 de 48.54 (MHAH) y 48.20 (MHAP), para la fase 2 fue de 56.17 (MHAH) y 56.45 (MHAP) y para la fase 3 de alimentación fue de 67.6 (MHAH) y 66.79 (MHAP), sugiriendo ventajas de hasta 10% superior comparado con la dieta control de maíz molido que fue de 45.64, 49.93 y 57.19 fase 1, 2 y 3, respectivamente. El contenido de energía de las dietas resultó ser similar para las tres, en las tres fases de alimentación, siendo ligeramente alto y constante en el tratamiento de harina con maíz sólo molido (4.69 vs 4.58 y 4.65, Fase 1; 4.57 vs, 4.56 y 4.49, Fase 2; 4.19 vs 4.12 y 4.09 Mcal/kg). En el caso del fósforo y la proteína cruda el contenido fue constantemente menor en las dietas de MHAP. El contenido de calcio y fósforo de las dietas, se presumía sería más elevado para los tratamientos que incluían MHA que el tratamiento control, por la adición de hidróxido de sodio y el proceso de hidrólisis alcalina, sin embargo, los datos son muy similares, en el caso de ambas dietas con MHA (pasta y harina), y de la dieta control.

Cuadro 6. Composición química de las dietas por tres fases experimentales.

| Fase        | Control <sup>1</sup><br>Harina |       |       | MHAH <sup>2</sup> |       |       | MHAP <sup>2</sup> |       |       |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|             | 1                              | 2     | 3     | 1                 | 2     | 3     | 1                 | 2     | 3     |
| MS, %       | 86.97                          | 87.62 | 87.88 | 90.76             | 90.62 | 91.03 | 90.23             | 90.50 | 90.98 |
| PC, %       | 20.53                          | 19.83 | 18.12 | 20.72             | 18.74 | 17.30 | 20.68             | 18.98 | 17.45 |
| EB, Mcal/kg | 4.69                           | 4.58  | 4.65  | 4.57              | 4.56  | 4.49  | 4.19              | 4.12  | 4.09  |
| Calcio %    | 1.63                           | 0.65  | 0.50  | 1.55              | 0.43  | 0.53  | 1.40              | 0.34  | 0.51  |
| Fósforo, %  | 0.45                           | 0.54  | 0.37  | 0.44              | 0.44  | 0.35  | 0.46              | 0.41  | 0.36  |
| Almidón, %  | 45.64                          | 48.54 | 48.20 | 49.93             | 56.17 | 56.45 | 57.19             | 67.67 | 66.79 |

<sup>1</sup> Dietas elaboradas con grano de maíz convencional.

<sup>2</sup> Dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

Serna-Saldivar *et al.*, (1988) indicaron que durante el proceso de hidrólisis del maíz el tiempo de remojo puede modificar el contenido de calcio, ya que observaron que a mayor tiempo de remojo del grano, se puede reducir el contenido de calcio hasta en un 50-60 %, lo cual comúnmente no pasa en el proceso tradicional de nixtamalización, por otro lado, el tipo de álcali utilizado como agente alcalino puede afectar la composición de calcio, ya que las sales que sustituyen al hidróxido de calcio como el hidróxido de sodio, favorecen la solubilidad de la celulosa y hemicelulosa, lo cual es importante para el proceso, pero no incrementa el contenido de calcio (Felix *et al.*, 2012). Bressani *et al.*, (2009) mencionan que la captación de calcio durante el proceso normal de nixtamalización, depende de factores tales como el tiempo de cocción, la temperatura, y la cantidad de hidróxido de calcio añadida. Gwartz y García-Casal, (2014) mencionan que el contenido de ácido fítico se reduce (arriba del 28%), durante el proceso de nixtamalización, debido a la adición de hidróxido de calcio, particularmente debido a la cantidad y tiempo de cocción de los granos así como de la biodisponibilidad de fósforo en el grano. Trejo-Gonzales *et al.*, (1982) mencionan que tras la adición de hidróxido de calcio el medio se mantiene alcalino, lo cual es necesario para hidrolizar la hemicelulosa del pericarpio, y al ser desdoblada la fibra del pericarpio mejorando la disponibilidad de nutrientes que se encuentran dentro, tales como proteínas, almidón, minerales, etc.

### 7.2.2. Comportamiento productivo y comportamiento durante el consumo.

En general la salud de los animales en el periodo de prueba fue buena, sin embargo un cerdo (macho castrado) que pertenecía al tratamiento de MHAP, murió al día 42 del periodo experimental, por los hallazgos a la necropsia la causa probable fue un problema respiratorio. Toda la información relacionada a este cerdo fue removida de la base de datos y no se consideró para el análisis.

El peso inicial y final del periodo de estudio, es decir a 63 días, no fueron diferentes entre tratamientos ( $P>0.05$ ). Los cerdos que consumieron la dieta de MHAP tuvieron mayor CDA ( $P<0.05$ ), superior en un 10.3%, mayor GDP ( $P<0.05$ ; 5.6%) y una menor GxC ( $P<0.05$ ; 4.7%) respecto a aquellos cerdos que consumieron la dieta de MHAH, cuando los datos se analizaron de forma acumulada. La GxC mejoró con la dieta de MHAH (0.433 vs 0.410 kg), lo que puede explicarse a que a medida que los cerdos crecieron la diferencia en el CDA se fue reduciendo (de aproximadamente 14 a 9% menos alimento consumido en ese tratamiento) por lo que hubo diferencias decrecientes en la GDP desde 170 g hasta 40 g diarios. Durante la primera semana hubo efecto (1.29 vs 1.70;  $P< 0.010$ ) de la forma del alimento (harina o pasta) en el CDA al igual que en la segunda semana (2.18 vs 2.32;  $P< 0.015$ ). El efecto de menor consumo de la MHAH durante los primeros días pudo deberse a que al ser una alimento con una gran capacidad de retener agua y no tener agua, se incrementa el tiempo de masticación debido a una mayor lubricación y además puede ser necesario mayor tiempo para deglutir el alimento lo cual disminuye el tiempo para consumir alimento, además la mezcla de la pasta estaba saturada a su máxima capacidad de retención de agua, lo cual evita que retenga más agua de la que tiene el alimento. Castillo *et al.*, (2009) mencionan que el cambio que sufre el almidón del grano debido a la gelatinización que sufre durante el tratamiento térmico-alkalino provoca que el grano pueda absorber mayor cantidad de agua, ya que ocurre un incremento en la solubilidad del almidón.

La GDP, CDA y GxC acumulada de los cerdos fue similar entre los tratamientos de MHA y el control. El comportamiento productivo de la dieta control fue similar ( $P>0.05$ ) al comportamiento de las dietas con MHA. Estos resultados de comportamiento productivo coinciden con las observaciones de comportamiento durante la alimentación, ya que indicaron que el promedio de DC (5.63 vs. 13.17 min), TOC (27.35 vs. 125.81 min) son afectados ( $P<0.01$ ) cuando el MHA es ofrecido en harina o pasta. Es decir, los animales

que consumieron más cantidad de alimento, los del tratamiento de MHAP, fueron aquellos que pasaron menos tiempo en el comedero y tuvieron comidas más cortas. Numéricamente el tratamiento control y el tratamiento de MHAH fueron muy similares en el comportamiento durante el consumo, salvo el tiempo de ocupación del comedero, ya que para el MHAH fue mayor (93.23 MHAP vs 125.81 MHAH, respectivamente).

Cuadro 7. Comportamiento productivo acumulado (63 días) de cerdos alimentados con dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado y maíz molido.

| Variable                           | Control <sup>1</sup><br>Harina | MHAH <sup>2</sup> | MHAP <sup>2</sup> | EEM    | P                       |      |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------------|------|
|                                    |                                |                   |                   |        | Contrastes <sup>3</sup> |      |
|                                    |                                |                   |                   |        | 1                       | 2    |
| Peso inicial, kg                   | 45.54                          | 47.11             | 46.21             | 0.759  | 0.23                    | 0.41 |
| Peso final, kg                     | 110.40                         | 110.74            | 113.35            | 1.322  | 0.26                    | 0.40 |
| Consumo diario de alimento, kg/día | 2.53                           | 2.34              | 2.61              | 0.039  | 0.01                    | 0.30 |
| Ganancia diaria de peso, kg/día    | 1.03                           | 1.01              | 1.07              | 0.016  | 0.05                    | 0.72 |
| Ganancia: Consumo, kg/día          | 0.408                          | 0.433             | 0.410             | 0.0060 | 0.02                    | 0.09 |

<sup>1</sup> Dietas elaboradas con grano de maíz convencional.

<sup>2</sup> Dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

<sup>3</sup> Los contrastes fueron los siguientes: 1. Harina (maíz hidrolizado) vs. Pasta (maíz hidrolizado) y 2. Harina (maíz hidrolizado) y Pasta (maíz hidrolizado) vs. Harina (maíz molido).

<sup>a</sup> Efecto del sexo ( $P < 0.01$ ), las respuestas fueron las esperadas: las hembras consumieron y ganaron menos, pero fueron más eficientes; no se encontraron interacciones con Tratamiento.

El número de VB se afectó (7.56 MHAH vs 4.53 MHAP;  $P > 0.05$ ) por la forma del alimento, es decir cuando se le añadió o no agua al alimento de MHA, pero no por el tipo de maíz, ya sea MHA o molido ( $P > 0.05$ ). El efecto de la forma del alimento en las VB puede deberse a que el contenido de agua de la pasta favoreció la lubricación del alimento. Mavromichalis, (2006) menciona que cuando los cerdos son alimentados con dietas líquidas, parte del requerimiento de agua, debe de ser cubierto por el contenido de agua del alimento ya que se ha demostrado que al alimentar cerdos con dietas líquidas disminuye el consumo de agua y el alimento en forma de pasta a pesar de no ser una dieta líquida, pudo haber cubierto parte de la cantidad requerida de agua por día y favorecer la lubricación para poder deglutir el alimento.

Cuadro 8. Comportamiento durante la alimentación de cerdos alimentados con dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado y maíz molido.

| Variable                                    | Control <sup>1</sup><br>Harina | MHAH <sup>2</sup> | MHAP <sup>2</sup> | EEM    | <i>P</i>                |      |
|---|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------------|------|
|   |                                |                   |                   |        | Contrastes <sup>3</sup> |      |
|   |                                |                   |                   |        | 1                       | 2    |
| No. de comidas                              | 7.56                           | 9.63              | 4.87              | 0.3760 | 0.01                    | 0.49 |
| Duración de comidas, minutos                | 12.29                          | 13.17             | 5.63              | 0.5255 | 0.01                    | 0.01 |
| Tiempo de ocupación en el comedero, minutos | 93.23                          | 125.81            | 27.35             | 6.1073 | 0.01                    | 0.03 |
| No. de visitas al bebedero                  | 7.00                           | 7.56              | 4.53              | 1.8258 | 0.01                    | 0.21 |

<sup>1</sup> Dieta elaboradas con grano de maíz convencional.

<sup>2</sup> Dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

<sup>3</sup> Los contrastes fueron los siguientes: 1) Harina (maíz parcialmente hidrolizado) vs Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) 2 Harina (maíz parcialmente hidrolizado) y Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) vs Harina (maíz molido).

### 7.2.3. Tamaño de partícula y coeficientes de digestibilidad.

Los resultados de la digestibilidad para materia seca, energía, proteína, calcio y fósforo, se presentan en el cuadro 9. Los coeficientes de digestibilidad en la fase 1 fueron más altos con el uso de MHA en comparación con el maíz molido (Control), independientemente que se haya alimentado, en forma de pasta o harina ( $P < 0.05$ ). La digestibilidad de la proteína, incrementó ( $P < 0.01$ ) cuando fue utilizado MHA (81.35 y 81.25%; MHA harina y pasta, respectivamente), ya que fue casi un 10% superior a la dieta control de maíz molido (72.80%) durante la primera fase de alimentación. La digestibilidad de almidón, fue mejor ( $P < 0.01$ ) en ambas fases de alimentación para las dietas que incluyeron MHA. En la primera fase de alimentación fue de: 99.77, 99.86 vs. 98.93 %, y durante la segunda fase de: 99.79 y 99.70 vs. 98.55 % para MHA harina y pasta vs control, respectivamente. La digestibilidad de energía, incrementó ( $P < 0.01$ ) durante la primera fase en las dietas con MHA en relación a la dieta con maíz molido (Control 83.05 vs MHAH 88.22 y 89.16 MHAP pasta), y para la segunda fase fueron similares ( $P > 0.05$ ; Control 89.67, MHAH 89.85 y MHAP 90.26). Lo que coincide con

Serna-Saldivar, *et al.*, 1987 que evaluaron la digestibilidad total de cerdos alimentados con harina de maíz sin nixtamalizar y nixtamalizado, y encontraron que la digestibilidad mejoró de 91.6 a 92.6%, respectivamente. Durante la primera fase los coeficientes de digestibilidad de energía, se incrementaron en una media de 5 unidades porcentuales lo que puede ser equivalente a 150 Kcal de EM. Sin embargo esta diferencia en digestibilidad que tuvo el MHA no se reflejó en el comportamiento productivo al final del experimento, solo para el MHAP durante la etapa correspondiente, donde se evaluó la digestibilidad, que es la primera fase de alimentación, efecto que no se vio en la segunda fase de alimentación, quizá debido a la variación que existió en el CDA. Las dietas donde se reflejó una mejora en digestibilidad de nutrientes y energía fueron aquellas con tamaño de partícula más fino que se traduce en una mayor superficie de área para las enzimas, lo cual coincide con lo reportado por Wondra *et al.*, 1995 que reportaron que la reducción del tamaño de partícula incrementa la digestibilidad de nutrientes debido a una mayor superficie de área de contacto para las enzimas mejorando la digestibilidad de nutrientes y energía. Rojas *et al.*, (2016) calcularon que una reducción de partícula del maíz de 865 a 677, 485 a 339 resulta en un incremento lineal de EM de 3,826, 3,868, 3,895 y 3,964 kcal/kg de materia seca debido a un incremento en la cantidad de almidón disponible a nivel ileal. Wondra *et al.*, 1995 encontraron que la EB incrementó 81.2 to 86.7% cuando se redujo el tamaño de partícula de 800 a 400  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Este efecto no tuvo mayor importancia en el comportamiento productivo de los animales (CDA, GDP y G:C). El consumo promedio diario de energía metabolizable (CDEM) calculado fue de 7.20, 6.73 y 7.94 Mcal/d para los tratamientos 1 a 3, respectivamente, que coincide con los coeficientes de digestibilidad de almidón y el CDA, ya que el tratamiento MHAH con menor CDEM fue el de menor CDA y el tratamiento en forma de MHAP tuvo el mayor CDA y así mismo de CDEM. Los consumos de CDEM calculados estuvieron dentro del rango que resulta de los cálculos obtenidos del modelo del NRC (2012) para animales de la edad y raza del experimento.

Cuadro 9. Coeficientes de digestibilidad de dietas con MHA y maíz molido en harina.

|  | Control <sup>1</sup><br>Harina | MHAH <sup>2</sup> | MHAP <sup>2</sup> | EEM    | <i>P</i><br>Contrastes <sup>3</sup> |       |
|--|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------------------------|-------|
|  |                                |                   |                   |        | 1                                   | 2     |
| Primera fase de alimentación (21 días) |                                |                   |                   |        |                                     |       |
| MS, %                                  | 82.02                          | 87.98             | 88.86             | 0.4531 | 0.353                               | 0.010 |
| PC, %                                  | 72.80                          | 81.35             | 81.25             | 0.6562 | 0.940                               | 0.010 |
| EB, %                                  | 83.05                          | 88.22             | 89.16             | 0.4769 | 0.345                               | 0.010 |
| Calcio, %                              | 70.22                          | 75.11             | 74.84             | 0.8864 | 0.885                               | 0.005 |
| Fósforo, %                             | 22.53                          | 41.48             | 37.87             | 1.6141 | 0.288                               | 0.010 |
| Almidón tot, %                         | 98.93                          | 99.77             | 99.86             | 0.1681 | 0.695                               | 0.010 |
| Segunda fase de alimentación (42 días) |                                |                   |                   |        |                                     |       |
| MS, %                                  | 88.04                          | 89.68             | 88.04             | 0.6236 | 0.817                               | 0.112 |
| PC, %                                  | 85.78                          | 85.59             | 84.82             | 0.8299 | 0.655                               | 0.694 |
| EB, %                                  | 89.67                          | 89.85             | 90.26             | 0.6292 | 0.881                               | 0.090 |
| Calcio, %                              | 54.60                          | 39.36             | 43.54             | 2.2999 | 0.386                               | 0.003 |
| Fósforo, %                             | 49.08                          | 32.17             | 35.48             | 2.8100 | 0.571                               | 0.005 |
| Almidón tot, %                         | 98.55                          | 99.70             | 99.70             | 0.1788 | 0.792                               | 0.010 |

<sup>1</sup> Dietas elaboradas con grano de maíz convencional.

<sup>2</sup> Dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

<sup>3</sup> Los contrastes fueron los siguientes: 1) Harina (maíz parcialmente hidrolizado) vs Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) 2) Harina (maíz parcialmente hidrolizado) y Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) vs Harina (maíz molido).

La respuesta en digestibilidad de calcio fue diferente ( $P < 0.005$ ) durante la primera fase de alimentación (cuadro 9), al comparar el tratamiento control 70.22 % vs MHAH 75.11% y MHAP 74.84 %. La digestibilidad de P en la primera fase ( $P < 0.05$ ), en los cerdos alimentados con el tratamiento control disminuyó (22.53%), en comparación a las dietas de MHAH y MHAP, 41.48 y 38.87%, respectivamente, sin embargo la respuesta de digestibilidad de calcio y fósforo en la segunda fase de alimentación tuvo el efecto contrario a la primera fase de alimentación, ya que la digestibilidad fue mayor para el tratamiento control tanto en calcio (54.60 control, 39.36 MHAH y 43.54% MHAP;  $P < 0.003$ ) como en fósforo (49.08 control, 32.17 MHAH y 35.48% MHAP;  $P < 0.005$ ), que ambos tratamientos con MHA. Entonces durante la primera fase de alimentación el proceso de hidrólisis parcial mejoró la biodisponibilidad de Ca y P (cuadro 7) posiblemente a liberación de fosforo fítico ocasionada por la hidrólisis de la fracción fibrosa del grano

(hemicelulosa), el pericarpio, lo que permite a las enzimas un mejor acceso para promover una mayor liberación de fósforo fítico que libera mayor cantidad de fósforo el cual debió ser absorbido en mayor cantidad. Se encontró una coincidencia con el comportamiento de la digestibilidad de P y la cantidad de fosfato de calcio adicionada a la dieta, ya que en la primera fase de alimentación fue incluido más fosfato de calcio que para la segunda fase (10.10 vs 4.50%), lo que pudo favorecer la digestibilidad de la dieta, ya que las fuentes como el fosfato cálcico (P inorgánico) alcanzan valores de digestibilidad de hasta 84%, superiores a la digestibilidad alcanzado con fuentes de origen vegetal (fósforo fítico), (Petersen, 2004). A pesar de no haber incluido ninguna enzima la la hidrólisis del grano pudo haber contribuido a un incremento, quizá mínimo, de la biodisponibilidad P y así mejorar la digestibilidad de P. En el caso del Ca, la digestibilidad disminuyó en la segunda fase, probablemente porque en la primera fase de alimentación la inclusión de fuentes inorgánicas, principalmente carbonato de calcio (7.26 vs 1.98 %), fue mayor (González-Vega *et al.*, 2012) que en la segunda fase, caso similar a la digestibilidad del P.

La digestibilidad de la proteína en la primera fase de alimentación (cuadro 9), mejoró ( $P<0.01$ ) con el uso de MHA (72.80 vs, 81.35 y 81.25%), sin embargo en la segunda fase de alimentación no se encontraron diferencias ( $P>0.01$ ) entre tratamientos. Las diferencias encontradas en la primera fase, se pudieran explicar porque durante la hidrólisis parcialmente alcalina se puede favorecer la desnaturalización y alterar la solubilidad de las proteínas permitiendo así que haya un incremento en la biodisponibilidad de las proteínas. La digestibilidad del almidón fue también mejor con MHA ( $P<0.01$ ): Control, 98.93% vs 99.77%, MHAH y 99.86% MHAP. En la fase 2 de alimentación la digestibilidad del almidón ( $P<0.01$ ) fue menor para el tratamiento control, 98.55 vs 99.70% MHAH y 99.70% MHAP. Bressani (2009), reportó que el proceso de nixtamalización incrementó la susceptibilidad del almidón a la actividad enzimática, conforme el tiempo de cocción aumento y en este estudio el contenido de almidón gelatinizado fue mayor para el MHA en el análisis químico de las dietas, que se resume en una mayor disponibilidad del almidón ya que más cadenas de amilopectina pudieron solubilizarse, disminuyendo la presencia de enlaces ramificados que afectan negativamente la digestibilidad debido a que las enzimas no pueden actuar sobre los enlaces  $\alpha$ -1,6 que lo componen.

La variación inherente al consumo de la materia prima y en la mejora en digestibilidad impidió notar cualquier efecto en el comportamiento productivo acumulado, lo que indica que probablemente la cantidad total de calcio aportada por la dieta y el pequeño aporte del grano de maíz probablemente hicieron que las dietas de MHA fueran más digestibles ya que a pesar de que el nivel de calcio fue el mismo en las tres dietas es probable que el proceso de hidrólisis parcial mejorara la biodisponibilidad del calcio ligado a fitatos en el grano de maíz.

#### 7.2.4. Composición corporal.

En el Cuadro 10 se muestra la composición corporal de los cerdos al final de la fase experimental. A pesar de la diferencia numérica entre tratamientos, no hubo diferencia significativas ( $P>0.05$ ) en relación a la masa muscular. Al usar los términos de grasa y músculo junto con el peso corporal para calcular los cortes primarios, no se encontraron diferencias ( $P>0.05$ ).

Cuadro 10. Composición corporal al final del experimento.

|   | Control <sup>1</sup><br>Harina | MHAH <sup>2</sup> | MHAP <sup>2</sup> | EEM    | <i>P</i>                |       |
|---|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------------|-------|
|   |                                |                   |                   |        | Contrastes <sup>3</sup> |       |
|   |                                |                   |                   |        | 1                       | 2     |
| Tercera fase de alimentación (63 días)        |                                |                   |                   |        |                         |       |
| Profundidad de grasa dorsal (cm) <sup>4</sup> | 1.14                           | 1.21              | 1.23              | 0.0486 | 0.788                   | 0.163 |
| Profundidad de músculo (cm) <sup>4</sup>      | 4.78                           | 4.83              | 4.87              | 0.1217 | 0.823                   | 0.627 |
| Tejido magro libre de grasa, kg               | 46.11                          | 46.07             | 47.03             | 0.5707 | 0.247                   | 0.531 |
| Cortes primarios, kg                          | 36.24                          | 36.06             | 36.80             | 0.4830 | 0.288                   | 0.745 |

<sup>1</sup> Dietas elaboradas con grano de maíz convencional.

<sup>2</sup> Dietas elaboradas con maíz parcialmente hidrolizado en álcali.

<sup>3</sup> Los contrastes fueron los siguientes: 1) Harina (maíz parcialmente hidrolizado) vs Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) 2) Harina (maíz parcialmente hidrolizado) y Pasta (maíz parcialmente hidrolizado) vs Harina (maíz molido).

<sup>4</sup> Son los datos promedio de las mediciones a la altura de la P2 a la décima costilla.

Sin embargo numéricamente fue más alta la profundidad de grasa y músculo de los cerdos alimentados con MHA sin importar la forma del alimento, lo que coincide con el consumo de EN calculada, que en fase 1 fue de 2.93 (Control), 3.11 (MHAH) y 3.15 (MHAP) Mcal/kg y en fase 2: 3.07 (Control), 3.13 (MHAH) y 3.14 (MHAP) Mcal/kg, indicando que a mayor proporción de energía en la dieta esta es dirigida a la síntesis de proteína y grasa.

### **VIII. Conclusiones**

El someter al maíz a una hidrolisis parcial mejoró la digestibilidad de nutrientes durante la primera fase de alimentación, al mismo tiempo el consumo de alimento en forma de pasta incremento el consumo de alimento para cerdos en crecimiento durante las primeras semanas de alimentación. Sin embargo el proceso de hidrolisis parcial logró compensar las fallas en consumo que hubo con la dieta en harina durante los primeros días, con una mejora en la eficiencia alimenticia en la respuesta final acumulada, por lo que al final de la prueba no se detectaron diferencias en el comportamiento productivo de los cerdos.

### **IX. Implicaciones**

El alimento en pasta ayuda a resolver problemas de dosificación y consumo de alimento para cerdos en crecimiento, cuando las dietas se elaboren con MHA. Los resultados de comportamiento productivo sugieren que la alimentación en pasta es eficiente si en cualquier momento se decidieran usar granos parcialmente hidrolizados, ya que su uso en forma de harina podría resultar en fallas en la productividad durante las etapas iniciales de alimentación (cuando menos durante los primeros 21 días) si no se le añade agua. Además de que con el uso de este tipo de dietas húmedas al disminuir el tiempo de ocupación en el comedero, se podría ayudar a disminuir la competencia dentro del corral, permitiendo a los animales más chicos consumir mayor cantidad de alimento, lo que contribuiría a reducir la variación que existe derivada de la competencia por espacios en el comedero dentro de los corrales de engorda, lo cual no fue evaluado, pero podría ser evaluado en otro estudio.

## X. Referencias

1. AACC International. 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. 10th ed. AACC Int., St, Paul, MN.
2. AOAC International. 2007. Official Methods of Analysis. 18th ed. Rev. 2. W. Hortwitz and G.W. Latimer, Jr., editor. AOAC Int., Gaithersburg, MD.
3. ASAE. 2008. Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
4. Bach K.K. and Jorgensen. 2001. Intestinal Degradation of Dietary Carbohydrates- from Birth to Maturity. Department of Animal Nutrition and Physiology, Danish Institute of Agricultural.
5. Bach Knudsen K.E. 2011. TRIENNIAL GROWTH SYMPOSIUM: Effects of polymeric carbohydrates on growth and development in pigs. J. Anim. Sci. 2011. 89:1965–1980.
6. Badui D. S. 2006. Química de los alimentos. Cuarta edición. Pearson Educación. México. pp 84-88.
7. Ball M.E.E., E. Magowan, K.J. McCracken, V.E. Beattie, R. Bradford, A. Thompson and F.J. Gordon. 2015. An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. Livestock Science 173: 48–54.
8. Bartolo-Pérez, P., J.L. Peña, A. Cruz-Orea y A. Calderón. 1999. Estudio de la composición química de pericarpio de maíz con las técnicas XPS y EDAX. Superficies y Vacío 8:64-68.
9. Bressani R. 2009. Chemistry, technology, and nutritive value of maize tortillas. Food Reviews International 6:(2) 225-264.
10. Bressani R., J.C. Turcios, A.S. Colmenares de Ruiz and P.P. Palomo. 2004. Effect of processing conditions on phytic acid, calcium, iron and zinc contents of lime cooked maize. J Agric Food Chem. 10;52 (5):1157-
11. Chávez E. 2011. XV Congreso Bienal AMENA 2011. Guadalajara, Jal. México (<http://www.engormix.com/MA-porcicultura/nutricion/articulos/estudio-comparativo-entre-dieta-t4719/141-p0.htm>).
12. Cheryan, M.; Shukla, R. (2001). "Zein: the industrial protein from corn". Industrial Crops and Products 13:171-192.

13. Choct M, Selby EAD, Cadogan DJ, Campbell RG. 2004. Effect of liquid feed ratio, steeping time, and enzyme supplementation on the performance of weaner pigs. *Aust J Agr Res*; 55:247–52.
14. Cid S.O., A.J. Monroy, K Waliszewski, G. Mariscal, y J.O. Angulo. 1998. Evaluación de los sólidos, nsolubles de nejayote como fuente de calcio para el cerdo. Tesis para obtener el título de maestro en ciencias en el Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, Ver.
15. Cisneros F., M.Ellis, K.D. Miller, J. Novakofski, E.R. Wilson and F.K. McKeit. 1996. Comparison of transverse and longitudinal real-time ultrasound scans for prediction of lean cut yields and fat-free lean content in live pigs. *J Anim Sci*. 74:2566–2576.
16. Dintzis F. R. and E. B. Bagley. 1995. Effects of thermomechanical processing on viscosity behavior of corn starches. *Journal of Rheology*. 39, 1483 (1995).
17. Fan, M. Z., W. C. Sauer, R. T. Hardin, and K. A. Lien. 1994. Determination of apparent ileal amino acid digestibility in pigs: Effect of dietary amino acid level. *J. Anim. Sci*. 72:2851-2859.
18. FAO, 1993. El maíz en la nutrición humana. Depósito de documentos de la FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
19. Fernández-Muñoz J. L., E. San Martín-Martínez, J. A. I. Díaz-Góngora, A. Calderón, H. Ortiz-Cárdenas, M.A. Gruintal-Santos. 2006. Dependencia del tiempo de reposo y de la temperatura de cocción sobre la difusión de los iones de calcio durante el proceso de cocimiento alcalino de maíz mediante la técnica de microondas. *Superficies y Vacío* 19(4):19-23.
20. Gonzalez, V.C. 2012. Aspects of calcium digestibility in pigs. Thesis for the degree of Master of Animal Science in Animal Sciences in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
21. Hancock, J.D., and K.C. Behnke. 2001. Use of ingredient and diet processing technologies (grinding, mixing, pelleting, and extruding) to produce quality feeds for pigs. In: A. J. Lewis and L. L. Southern, editors, *Swine Nutrition*. 2nd ed. CRC Press, Washington, DC. p. 474-63.
22. Hogberg M., D. Mahan and Seerley R., 1981. Physical forms of feed-Feed processing for swine. *Pork industry handbook*, Michigan state university.

23. Lawlor P.G., P.B. Lynch, G. E. Gardiner, P.J. Caffrey and J.V. O'Doherty. 2002. Effect of liquid feeding weaned pigs on growth performance to harvest. *J Anim Sci.* 80:1725-1735.
24. Lee I. Chiba Published Online: 29 NOV 2012 10:31AM EST.
25. Lupano C.E., 2013. Modificaciones de componentes de los alimentos: cambios químicos y bioquímicos por procesamiento y almacenamiento. 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
26. Makinde and Sonaiya, 2007. *Liv Res Rur Dev* 19(10).
27. Medel P., M.A. Latorre, C. de Blas, R. Lázaro and G.G. Mateos. 2004. Heat processing of cereals in mash or pellet diets for young pigs. *Animal Feed Science and Technology* 113:127-140.
28. Missotten, A.M., J. Michiels, J. Degrootem y S. De Smet. 2015. Fermented liquid feed for pigs: an ancient technique for the future. *Journal of Animal Science and Biotechnology*.6:4.
29. Myers W. D., P. A. Ludden, V. Nayigihugu and B. W. Hess. 2004. Technical Note: A procedure for the preparation and quantitative analysis of samples for titanium dioxide. *J Anim Sci.* 82:179-183.
30. Nannoni E., G. Martelli, M.Cecchini,G. Vignola, M. Giammarco, G Zaghini and L Sardi. 2013. Water requirements of liquid-fed heavy pigs: Effect of water restriction on growth traits, animal welfare and meat and ham quality. *Livestock Science* 151: 21–28.
31. NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington,DC.
32. Ohh, S.J., G.L. Allee, K.C. Behnke y C.W. Deyoe. 1983. Effects of a particle size of corn and sorghum grain on performance and digestibility of nutrients for weaned pigs. *J. Anim. Sc.* 57 (1):260.
33. Reiling B. A. 2011. Feed Dry Matter Conversions. Neb Guide. Referencia: <http://extensionpubs.unl.edu/publication/9000016367956/feed-dry-matter-conversions/>
34. Rojas O.J. 2015. Use of feed technology to improve the nutritional value of feed ingredients and diets fed to pigs. DISSERTATION for the degree of Doctor of

Philosophy in Animal Sciences in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.

35. Rojas O. J., Y. Liu, and H. H. Stein. 2016. Effects of particle size of yellow dent corn on physical characteristics of diets and growth performance and carcass characteristics of growing–finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 2016.94:619–628 doi:10.2527/jas2015-9054.
36. G. I. Petersen. 2004. Phosphorus Digestibility of Inorganic Phosphorus Sources by Growing Pigs. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science Major in Animal Science South Dakota State University.
37. Rooney L. W. and R. L. Pflugfelder. 1986. Factors Affecting Starch Digestibility with Special Emphasis on Sorghum and Corn. *J Anim Sci.* 63:1607-1623.
38. Santiago R.D., Figueroa C. J.D., Veles M. J.J., Mariscal M. R. S., Camacho R. R., Ramos G. M., Gaytan M.M., Morales S. E. 2015. Resistant Starch Formation in Tortillas from an Ecological Nixtamalization Process. *Cereal Chem.*92 (2): 185-192.
39. Sefa-Dedeh S. Cornelius B., Sakyi-Dawson E., Ohene A. E. 2004. Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry* 86: 317–324.
40. Serna-Saldívar S.O. 1990. Technology, chemistry and nutritional value of alkaline cooked corn products. Vol. X of *Advances in Cereal Science and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, pp 243-307.
41. Serna-Saldívar, S.O., D.A., Knabe, L.W. Rooney, and T.O. Jr. Tanksley, 1987. Effect of lime cooking on energy and protein digestibilities of maize and sorghum. *Cereal Chemists.* 64: 247-252.
42. Shields, Jr. R. G., K. E. Ekstrom and D. C. Mahan. 1980. Effect of weaning age and feeding method on digestive enzyme development in swine from birth to ten weeks. *J. Anim. Sci.* 2,:
43. Shurson J. What We Know About Feeding Liquid By-Products to Pigs. University of Guelph.
44. Soria. 2009. Efecto de la adición de enzimas fibrolíticas y una fitasa para cerdos en crecimiento sobre la digestibilidad de nutrientes. *Téc Pecu Méx.* 47(1); 1-14.

45. Trejo-Gonzalez. A., A. Feria-Morales, and C. Wild-Altamirano. 1982. The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Advan. Chem. Ser.* 198:245-263.
46. Véles M. J. J. 2004. Tesis que para obtener el grado de: Maestro en Tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional.
47. Walsh J. F. Corn proteins. 1937. *Industrial and engineering chemistry.* (29)6: 673-674).
48. Witczak, M., R. Ziobro, L. Juszczyk, J. Korus. 2015. Starch and starch derivatives in gluten-free systems—a review. *Journal of Cereal Science.* S0733-5210(15)30038-2.
49. Wondra, K. J., J. D. Hancock, G. A. Kennedy, R. H. Hines, and K. C. Behnke. 2005. Reducing particle size of corn in lactation diets from 1,200 to 400 micrometers improves sow and litter performance. *J. Anim. Sci.* 73:421-426.
50. Wondra, K. J., J. D. Hancock, K. C. Behnke, R. H. Hines, and C. R. Stark. 1995. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 73:757-763.
51. Teague, H.S. et al., 1970. *Animal Science Memo #201.* Columbus, OH:Ohio Agricultural Experiment Station.
52. Traylor, S.L., J.D. Hancock, K.C. Behnke, C.R. Stark, and R.H. 1994. Mix time affects diet uniformity and growth performance of nursery and finishing pigs. Kansas State University. <https://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/3340/Swine94pg171-175.pdf?sequence=1&isAllowed=y>