



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

“Efecto de la inclusión de fitasas en las dietas de cerdos destetados: Un
meta-análisis”

TESINA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA**

PRESENTA:

P. MVZ. JUAN ANGEL MONTALVO MENDOZA

ASESORES:

Dr. en C. MANUEL GONZÁLEZ RONQUILLO

Dr. en BCA. JORGE OSORIO AVALOS

Dra. en C. LIZBETH ESMERALDA ROBLES JIMÉNEZ



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, Junio 2025

INDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	2
2.1. Porcicultura en México.....	2
2.2. Principales productores.....	3
2.3. Importancia de la producción porcina.....	4
2.4. Principales consumidores en México.....	4
2.5. Datos sobre producción y consumo	4
3. Fosforo.....	5
3.1. Fosforo y medio ambiente	7
4. Fitassas	9
4.1. Dietas para cerdos uso de fitassas	15
5. JUSTIFICACIÓN.....	17
6. OBJETIVOS.....	18
6.1. General.....	18
6.2. Específicos.....	18
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
7.1 Estrategia de búsqueda y criterios de selección.....	20
7.2 Desarrollo estadístico.....	22
8.0 RESULTADOS.....	19
9.0 Discusión.....	31
9.1 Razas de cerdos	31
9.2 Ganancia de peso	32
9.3 Consumo de alimento.....	33

INDICE	Pág.
9.4 Relación Consumo de alimento: ganancia de peso FG ratio.....	39
10. Conclusiones.....	40
11. Límite de espacio.....	41
12 Límite de tiempo.....	42
10. LITERATURA CITADA.....	43

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Titulo	Pag.
Cuadro 1	Composición química de ingredientes utilizados en la alimentación de cerdos.	6
Cuadro 2	Enzimas exógenas para piensos para cerdos y sustratos objetivo.	10
Cuadro 3	Avances recientes en huéspedes microbianos para la producción de fitasas comerciales	14
Cuadro 4	Modo de acción y efecto principal en fitasas utilizadas en dietas para cerdos en la fase de destete.	16
Cuadro 5	Estudios realizados en las razas de cerdos en destete suplementados con fitasas exógenas.	26
Cuadro 6	Tamaño del efecto y heterogeneidad para el uso de fitasas lechones.	27
Cuadro 7	Posición mineral, energética y proteica de dietas de artículos incluidos en el metaanálisis.	35

INDICE DE FIGURAS

Figura	Titulo	Pag.
Figura 1	Proceso de eutroficación por excreción de fosforo en dietas para cerdos	8
Figura 2	a) Imagen de fitato con 6 grupos fosfato, b)El ácido fítico forma quelatos con cationes metálicos.	
Figura 3	Imagen del complejo de la fitasa y del fitato.	
Figura 4	Función y producción de la vitamina D.	
Figura 5	Relación del calcio y la parathormona (PTH)	
Figura 6	Diagrama de flujo PRISMA de la revisión sistemática	
Figura 7	Diagrama de bosque de la ganancia diaria de peso (kg/d) de los estudios de fitasa en cerdos en destete.	
Figura 8	Diagrama de bosque del consumo de materia seca (kg/d) a partir de estudios con fitasa en cerdos en destete.	
Figura 9	Gráfico de relación consumo de alimento: ganancia de peso a partir de estudios con fitasa en cerdos en destete.	

1.- INTRODUCCIÓN

La producción porcina tiene como finalidad, el suministro de carne para el consumo humano, ya que es una fuente valiosa de proteína, energía, vitaminas, minerales y micronutrientes (Benítez *et al.*, 2015).

A nivel global se reporta que la cría intensiva de cerdos genera alrededor de 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería, los principales efectos ambientales se centran en la cadena de suministro de alimentos balanceados con el uso de maíz, soya, trigo, cebada etc. así como un elevado volumen de agua dulce para asimilar la carga de contaminantes derivados del sistema de producción (Giraldi *et al.*, 2021).

La alimentación de los cerdos es la principal causa del impacto ambiental en su producción, representando el 70% de los costos de alimentación. Muchos cerdos consumen más nutrientes de los que necesitan, y el exceso se elimina en sus desechos, lo que genera desperdicio. La cantidad de nutrientes excretados depende de cuánto comen, cómo su cuerpo los aprovecha y qué tan bien se ajusta la dieta a sus necesidades (Pomar *et al.*, 2021).

En este sentido, la mayor parte del fósforo introducido al medio ambiente por el sector agrícola proviene del estiércol animal. Los cerdos excretan aproximadamente el 90% del fósforo sobrante a través de las heces (purines). Por este motivo, cuando se utiliza estiércol como abono, la planta no es capaz de extraer todo el fósforo. Por lo tanto, existe una filtración de este exceso de mineral, a través de la tierra, el cual puede acelerar el crecimiento de algas en cauces de aguas o mares y causar eutrofización, lo cual se convierte en un problema para la vida acuática (Soler, 2022).

Una alternativa, es la administración de fitasas exógenas de origen microbiano utilizadas en la nutrición de los cerdos, los cuales mejoran el aprovechamiento de los nutrientes, con mayor énfasis el fósforo (lo que su vez reduce la excreción de este mineral), asociado a la digestibilidad de proteínas y aminoácidos, energía, calcio y zinc relacionado directamente con el rendimiento del animal (Soler, 2022).

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. PORCICULTURA EN MEXICO

El cerdo fue seleccionado para emprender viajes en embarcaciones debido a su característica de ser omnívoro, la capacidad de convertir desechos alimentarios en carne, ocupar poco espacio en las embarcaciones, en tierra firme no requerían cuidados especiales ni mano de obra además de adaptarse a cualquier medio con una reproducción prodiga y la capacidad de cebarse mientras los soldados caminaban, por ello la llegada del cerdo a México se remonta a los viajes de conquista durante el siglo XVI (Evin y Cucchi, 2017)

Según Pastoureau (2014), la domesticación del cerdo surge más como un fenómeno socioeconómico que biológico, propagándose rápidamente gracias a su naturaleza omnívora, la abundancia de su carne y su grasa, así como su rápida reproducción.

La carne de cerdo contiene un elevado valor nutricional, siendo rica en proteínas, minerales (hierro y zinc) y vitaminas del complejo B, en Mexico, una gran parte de la carne de cerdo de consumo nacional es abastecida por importaciones (*Cortés et al.*, 2012).

La porcicultura es una de las áreas ganaderas más dinámicas que existe en el país, además de ser la actividad pecuaria que posee diferentes sistemas de producción enfocados a la generación de diversos productos para el mercado. En México existen distintos estratos de producción, desde las empresas integradas verticalmente hasta los pequeños productores de traspatio a nivel familiar o rural (Reyes y López, 2019).

México importo en el año 2020, 337 mil toneladas y exporto 9 mil toneladas. Por tanto, existe una desventaja comparativa en la producción de carne de cerdo, esto implica que la importación de este tipo de carne ha sido cada vez mayor, demostrando que en términos de precio o de calidad, la producción nacional es menos eficiente que la de otros países, por lo que la importación se vuelve una mejor alternativa, al ser más redituable en términos macroeconómicos (Magaña et al., 2023).

2.5. DATOS SOBRE PRODUCCION Y CONSUMO MUNDIAL

Países como China, Unión Europea y Estados Unidos son los principales productores con un 78.4% de la producción mundial además de ser los principales consumidores con un 75.6% del consumo mundial. El comercio internacional está liderado por la Unión Europea, Estados Unidos y Brasil, que de manera conjunta representaron el 76.5% de las exportaciones mundiales durante el año 2023. De acuerdo con la proyección de la OCDE y la FAO, el consumo per cápita promedio mundial de carne de cerdo en 2023 se ubicó en 10.9 kilogramos anuales. El consumo per cápita de carne de cerdo en México de acuerdo con el consejo mexicano de la carne (COMECARNE) es de 21 kg por lo que el mexicano consume alrededor de 1.96 kg mensuales (FIRA, 2024)

El cerdo representa más de un tercio de la carne producida en todo el mundo y es un componente importante en la seguridad alimentaria de las economías agrícolas y el comercio mundial (Wang y Li, 2024). En las últimas tres décadas ha habido un cambio en la producción porcina principalmente en los países en desarrollo pasando de explotaciones a pequeña escala a unidades de producción intensiva a gran escala. Los pequeños productores son el segmento más vulnerable y afectado, por lo tanto, la transformación de la producción porcina a granjas de mediana y gran escala, junto con una mayor estandarización de los sistemas de producción y la bioseguridad, facilitaran el desarrollo de sistemas de producción porcina respetuosos con el medio ambiente, rentables y sostenibles (Wang y Li, 2024).

2.2. PRINCIPALES PRODUCTORES NACIONALES

Los principales estados mexicanos productores de carne de cerdo en canal son: Jalisco, Sonora, Puebla, Guanajuato, Yucatán y Veracruz, quienes conjuntamente generaron alrededor de 76.5% de la producción de carne de cerdo a nivel nacional en 2016 (Reyes *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Principales estados productores de carne de cerdo en el año 2022.

	ESTADO	PRODUCCION N/ TONELADAS		ESTADO	PRODUCCION (MILLONES DE TONELADAS)		ESTADO	PRODUCCION N/TONELADAS
1	JALISCO	399,562	12	MEXICO	22,408	23	COLIMA	7,717
2	SONORA	308,499	13	GUERRERO	22,073	24	CAMPECHE	5,797
3	PUEBLA	183,1134	14	NUEVO LEON	19,981	25	COAHUILA	5,775
4	YUCATAN	162,288	15	SINALOA	19,876	26	MORELOS	5,213
5	VERACRUZ	156,857	16	AGUASCALIENTES	19,153	27	NAYARIT	4,836
6	GUANAJUATO	138,027	17	HIDALGO	15,672	28	DURANGO	4,169
7	MICHOACAN	51,679	18	TABASCO	13,529	29	QUINTANA ROO	3,871
8	CHIAPAS	31,776	19	TLAXCALA	12,565	30	CIUDAD DE MEXICO	1,663
9	OAXACA	29,614	20	ZACATECAS	10,783	31	BAJA CALIFORNIA NORTE	1,124
10	QUERETARO	27,448	21	TAMAULIPAS	10,175	32	BAJA CALIFORNIA SUR	1,012
11	SAN LUIS POTOSI	26,001	22	CHIHUAHUA	8,039			

Adaptado de Hernández *et al.* (2023)

Los sistemas de producción porcina de mediana escala, representan el 30 % de las granjas porcinas de México, enfrentan dos obstáculos clave que impactan en su desempeño económico y financiero. El primero es la ausencia de un plan de ventas basado en el peso de los cerdos, lo que afecta negativamente tanto a la rentabilidad como a la gestión de los recursos. El segundo obstáculo es la inadecuada gestión de residuos, que dificulta los esfuerzos para mitigar los impactos ambientales generados por las granjas porcinas (del Rosario *et al.*, 2024).

2.4. CONSUMO NACIONAL

La porcicultura es una actividad importante en México es el segundo cárnico más consumido. La producción nacional está liderada por Jalisco (23.3%), Sonora (17.8%), Puebla (10.6%), Yucatán (9.4%), Veracruz (9.2%) y Guanajuato (7.9%), quienes de manera conjunta participan con 78.1% de la producción nacional (FIRA, 2024).

México registra un saldo deficitario en el comercio exterior de carne de cerdo. En 2020 se importaron 377 mil toneladas y se exportaron 9 mil toneladas, registrándose un saldo de -368.3 mil toneladas (Magaña et al., 2023). La industria nacional cubre el 55 % de la demanda local y el déficit se compensa con la importación de un millón de toneladas al año, especialmente de EE. UU. (88 %) y Canadá (12 %), lo que convierte a México en el tercer mayor importador de carne de cerdo del mundo (Estévez y Miranda, 2022)

La producción porcina ocupa una posición intermedia en la cadena de la industria, mientras que el segmento posterior está formado por el sacrificio de los cerdos y la transformación de la carne, que en última instancia abastecen al mercado consumidor final de productos porcinos (Wang y Li, 2024).

2.3. LA ALIMENTACIÓN EN LA PRODUCCION PORCINA

La eficiencia alimentaria representa la capacidad del cerdo para utiliza los nutrientes de la dieta para el mantenimiento, la ganancia de masa magra y la acumulación de lípidos. Está estrechamente relacionada con el metabolismo energético, ya que la oxidación de los componentes que contienen carbono en el alimento impulsa todos los procesos metabólicos. Para las granjas individuales, repercute en la rentabilidad. Para la industria porcina, representa su posición competitiva frente a otras fuentes de proteínas. Para los economistas de la alimentación, significa una menor demanda de recursos alimentarios mundiales. También hay implicaciones medioambientales y sociales. (Patience *et al.*, 2015)

Es de suma importancia la optimización de la alimentación en cerdos, el consumo de alimento es el parámetro más crítico en un programa de alimentación. En los cerdos para

mercado, las variables más importantes son el consumo de alimento, la ganancia de peso diario, la conversión alimenticia, el tiempo para alcanzar el peso a mercado y las características de la canal (rendimiento de canal, grasa dorsal y porcentaje de carne magra), el satisfacer los requerimientos nutricionales de los cerdos, es uno de los factores que más afectan los rendimientos productivos por tanto es necesario conocer que nutriente se necesita y en qué cantidad según la etapa de producción (National Research Council, 2012).

Las vitaminas y los minerales representan un porcentaje relativamente pequeño de la dieta, pero son fundamentales para la salud, el bienestar y el rendimiento de los animales; ambos desempeñan un papel bien definido en el metabolismo, y sus necesidades pueden variar en función de la etapa fisiológica de los animales. Al mismo tiempo, la insuficiencia de vitaminas y minerales en la alimentación animal puede perjudicar el crecimiento y desarrollo de músculos y huesos. Por lo anterior, las dietas de los cerdos deben ser balanceadas para calcio, fósforo, cloro y sodio (Sampath *et al.*, 2023), así como el resto de minerales y vitaminas preferentemente.

3. FOSFORO

El fósforo (P) es un mineral esencial para el metabolismo de todos los seres vivos donde juega un papel importante en el desarrollo y mantenimiento de las estructuras óseas. Es un componente del ATP (Adenosín Trifosfato o Trifosfato de Adenosina) y los ácidos nucleicos y forma parte de los fosfolípidos que integran y dan flexibilidad a las membranas celulares. Es necesario suministrar cantidades adecuadas de fósforo en las dietas del ganado, hasta la fecha los productores han utilizado fosfato inorgánico el cual es un recurso limitado y no renovable que se agotará en aproximadamente 100 a 200 años al ritmo actual de extracción (Lautrou *et al.*, 2021).

En los ingredientes vegetales, el P orgánico es almacenado en las semillas como ácido fítico, el cual representa la fracción mayoritaria, siendo el ácido fítico, el fosfoglicido más abundante. En torno a un 60-80% del P total contenido en los granos y sus subproductos se encuentra como parte del ácido fítico y sus sales, generalmente como fitatos de calcio,

potasio y magnesio, como consecuencia de su alto potencial quelante, el ácido fítico forma sales insolubles en un pH neutro impidiendo su absorción a nivel intestinal. Por ello se considera como anti nutriente en alimentación (Rebollar y Mateos, 1999).

El fosforo es un elemento esencial en la nutrición animal en cerdos, es obtenido pobremente de los fitatos contenidos en el alimento, debido a que el contenido digestivo del estómago e intestino del cerdo tiene escasa actividad fitásica, para romper y separar el P de la molécula de inositol. Los componentes mayoritarios de dietas para monogástricos son de origen vegetal por lo tanto una fracción importante de fosforo está en forma de P fítico (Philippi *et al.*, 2023).

Consecuentemente, en la alimentación de los cerdos es indispensable la suplementación con fuentes inorgánicas de fósforo, a fin de satisfacer los requerimientos del animal. Estas fuentes tienen diferentes grados de utilización, por lo que, el nivel de inclusión del fósforo inorgánico en las dietas depende de la biodisponibilidad del elemento de los diferentes fosfatos (Freseuie *et al.*, 2004). En el cuadro 2 se muestra la composición química de algunos ingredientes utilizados en la alimentación de cerdos, así como su contenido de P y su porcentaje de utilización en el cerdo.

Cuadro 2. Composición química de ingredientes utilizados en la alimentación de cerdos.

Ingrediente	% PC	EM, Mj/kg MS	% P total	% P disponible	% de utilización del P
Soya harina	40.0	16.9	0.5	0.25	50
Maíz grano	9.6	16.0	0.3	0.15	50
Sorgo grano	10.9	15.6	0.5	0.15	30
Heno alfalfa	18.0	6.0	0.3	0.15	50
Salvado trigo	17.5	7.5	1.3	0.5	38

PC: proteína cruda; EM: Energía metabolizable; P: fósforo. Adaptado de Ewing (1997).

El fósforo es uno de los principales componentes estructurales del hueso en la forma de una sal de fosfato de calcio denominada hidroxiapatita. Los fosfolípidos como la fosfatidilcolina son importantes componentes estructurales de las membranas celulares. Toda la producción y almacenaje de energía depende de compuestos fosforilados, como el adenosín trifosfato (ATP) y la creatina fosfato. Los ácidos nucleicos (ADN y ARN), los cuales son responsables del almacenaje y transmisión de la información genética, son largas cadenas de moléculas fosforadas. Un cierto número de enzimas, hormonas, y moléculas de señalización celular, dependen de la fosforilación para su activación. El fósforo también ayuda a mantener el balance ácido-base (pH) normal al actuar como uno de los buffers más importantes del organismo. Además, el 2,3-difosfoglicerato (2,3-DPG), el cual es una molécula fosforada, se une a la hemoglobina en los glóbulos rojos y regula la distribución de oxígeno a los tejidos del cuerpo (Knochel *et al.*, 2006).

3.1. FOSFORO Y MEDIO AMBIENTE

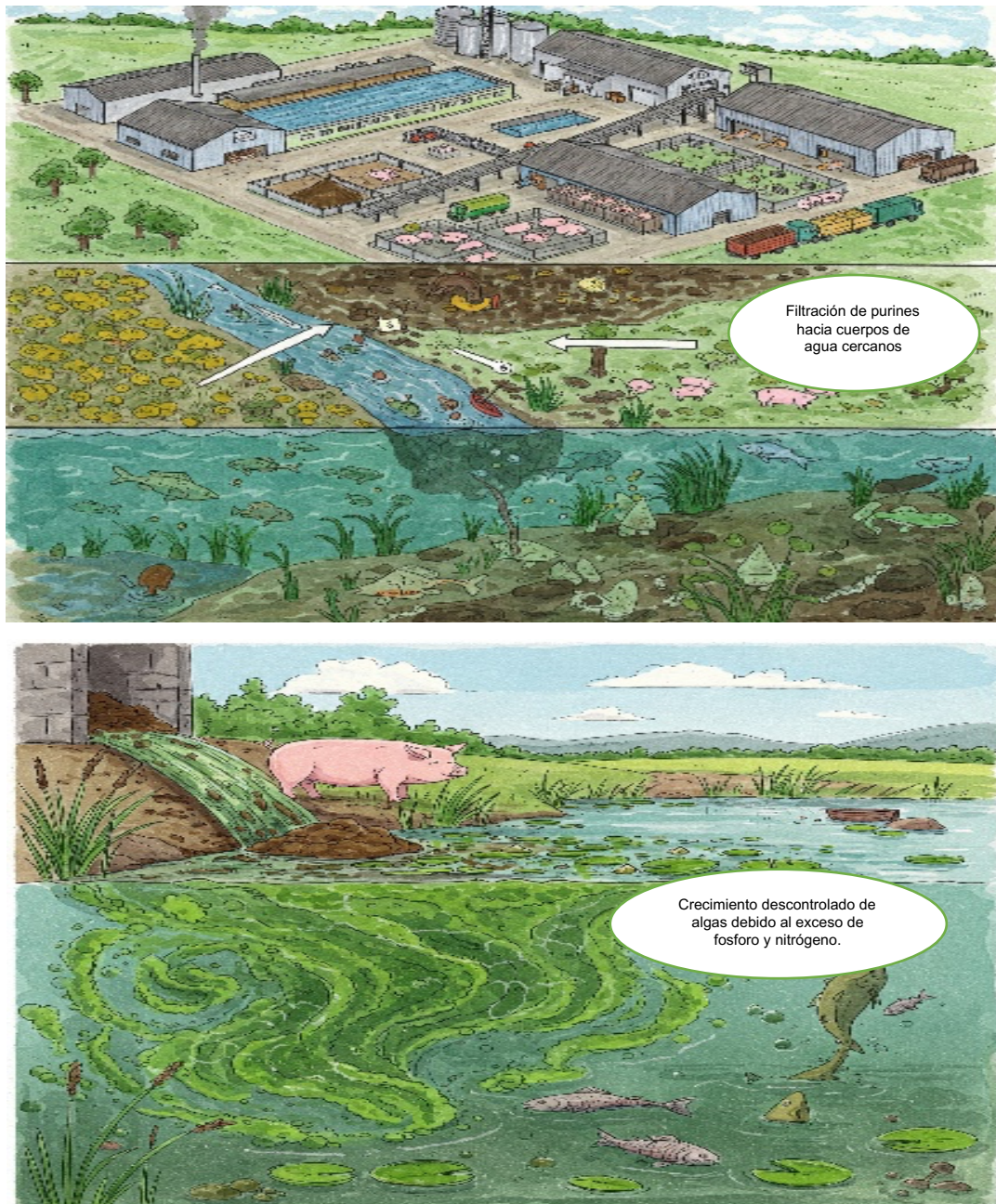
La alimentación animal es uno de los principales responsables del uso de la tierra y el agua, así como de la producción de gases de efecto invernadero, la reducción de los recursos hídricos y de la tierra lo cual ocasiona el aumento de precio de los ingredientes alimentarios (DiGiacomo y Leury, 2019).

El fosforo es un nutriente esencial para todos los seres vivos, pero en exceso puede ser perjudicial. Este elemento es aplicado regularmente como fertilizante para aumentar el rendimiento de los cultivos. Las preocupaciones ambientales surgen cuando el fósforo se filtra en las aguas subterráneas o se escurre durante las lluvias a los arroyos, ríos, lagos y estuarios. Estos nutrientes continúan sirviendo como fertilizantes una vez que llegan al agua porque pueden alimentar a la flora acuática (Laughinghouse *et al.*, 2022)

Debido a que en aguas superficiales tienen lugar el crecimiento incontrolado de algas a causa del exceso de fosforo, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales (Arohuanca, 2016). En la Figura 1, se muestra el proceso de eutrofización por excreción de P en dietas para

cerdos, con la subsecuente contaminación de suelo, aguas y mantos freáticos, mostrando un crecimiento excesivo de algas y la muerte de seres acuáticos por exceso de P en el agua.

Figura 1. Proceso de eutroficación por excreción de fósforo en dietas para cerdos.



Cita: Desarrollado con IA (Aplicación Gemini, autoría propia).

4. FITASAS

Comercialmente, se han desarrollado una serie de enzimas exógenas para la utilización en dietas para cerdos (Cuadro 3), las cuales van desde su utilización en una mejora en la absorción y digestión de carbohidratos, proteínas y lípidos, así como la absorción de P en la dieta, estas últimas son las fitasas.

Las fitasas pueden ser de origen bacteriano, las cuales son las enzimas exógenas más utilizadas en las dietas de animales monogástricos y representan el 60% del mercado mundial de enzimas alimentarias (Adeola y Cowieson, 2011; Dersjant-Li *et al.*, 2014), actuando en la hidrólisis del fitato (*myo*-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakis [dihidrógeno] fosfato) para liberar el fosfato de este complejo, mejorando la digestibilidad del fósforo, el calcio, los aminoácidos, la energía y reduciendo la excreción de P inorgánico al medio ambiente (EFSA, 2012; Dersjant-Li *et al.*, 2014; De Faria *et al.*, 2015). Las fitasas más utilizadas en la alimentación animal son las fosfatasa ácidas de histidina (FAH), otras clases de fitasas son la fitasa de hélice β (BPPHy o fitasa alcalina), la fitasa ácida púrpura y la proteína tirosina fosfatasa (Lei *et al.*, 2012) (Figura 2).

La actividad de la fitasa se expresa como FTU (unidad de fitasa) y una unidad de fitasa se define como la cuantificación de la enzima que liberará 1 mol de ortofosfato inorgánico por minuto en las condiciones del ensayo (AOAC, 2000). La fitasa microbiana suplementada es activa principalmente en el estómago y en la parte superior del intestino delgado. La fitasa es una molécula proteica que puede ser hidrolizada por la proteasa endógena en el tracto digestivo de los animales (Dersjant-Li *et al.*, 2014). Por lo tanto, una mejora de la disponibilidad de fósforo y otros minerales en las dietas para cerdos con el uso de fitasas reducen la contaminación del suelo (Sefer *et al.*, 2012). La fitasa en las dietas para cerdos se añade generalmente a 2.5 g/kg de alimento, pero se hidroliza menos del 50% del fitato en la dieta (Dersjant-Li *et al.*, 2017).

Por lo tanto, es necesario incluir concentraciones mayores de fitasa en la dieta para hidrolizar más del 60% del fitato (Figura 3), y así reducir sus efectos anti nutricionales y mejorar la eficiencia del uso del fósforo orgánico (Dersjant-Li *et al.*, 2014). Adeola y

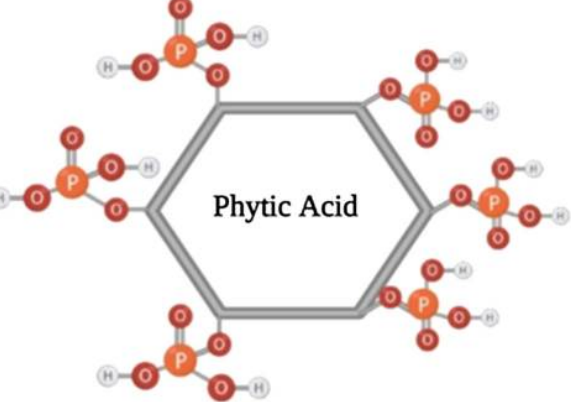
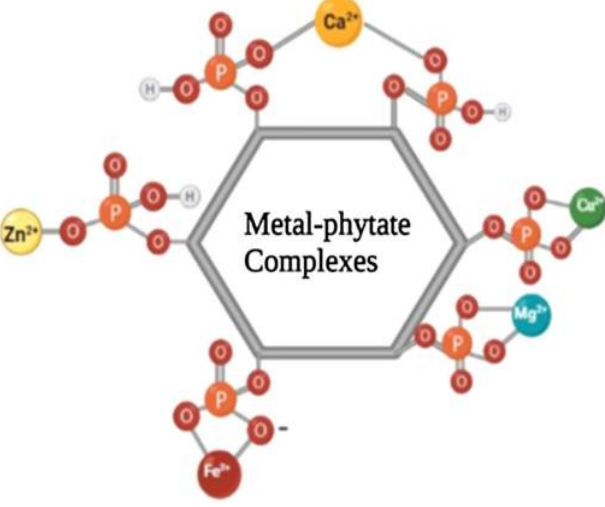
Cowieson (2011), mencionan que un nivel de inclusión de fitasa superior a 2.5g/kg de alimento caracteriza una dosis alta de inclusión de fitasas. La eficacia depende de varios factores, como la etapa de crecimiento del cerdo (destete, crecimiento, finalización), el tipo de dieta (varía en función de la inclusión de ingredientes) y la fuente de fitasa (Jongbloed *et al.*, 2004). El aumento del nivel de inclusión de la enzima no representa necesariamente una mejora lineal en la utilización de los nutrientes (Da Silva *et al.*, 2019). Además, ya se ha estudiado la recuperación de enzimas suplementarias, esto después de que Tsai *et al.* (2019) evaluaran la cantidad de enzimas ingeridas (g/d), la excreción fecal y urinaria (g/d) y la retención de enzimas (g/d y %).

Cuadro 3. Enzimas exógenas para piensos para cerdos y sustratos objetivo.

Enzima	Sustrato objetivo
Fitasas	Ácido fítico
β-Glucanasas	β-Glucano
Xilanasas	Arabinoxilanos
α-Galactosidasas	Oligosacáridos
Amilasa	Almidón
Mananasas	Matriz de la pared celular (componentes de fibra)
Celulasas	
Hemicelulasas	
Pectinasas	
Proteasas	Proteínas
Lipasas	Lípidos

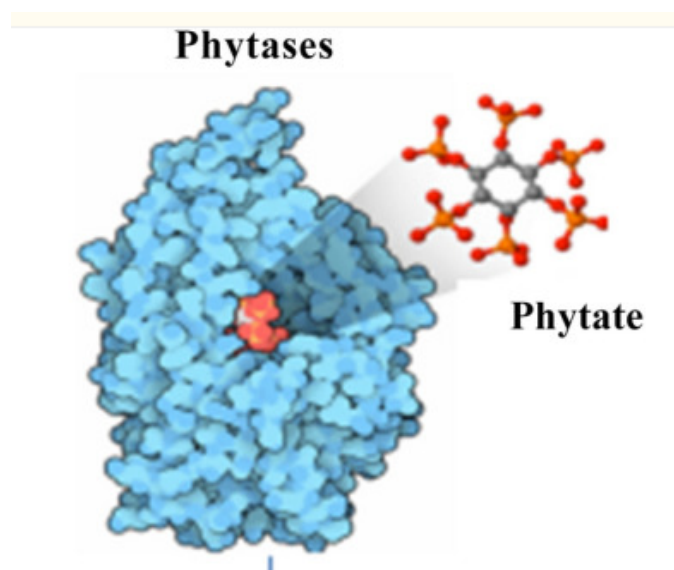
Adaptado de Ravindran, 2013.

Figura 2. 2a) Imagen de fitato con 6 grupos fosfato; 2b) El ácido fítico forma quelatos con cationes metálicos.

	Fig. 2a. Imagen de fitato con 6 grupos fosfato.
	Fig. 2b. El ácido fítico forma quelatos con cationes metálicos (Fe+2, Fe+3, Ca+2, Mg+2, Zn+2, Cu+2) divalentes o trivalentes impidiendo su absorción en la dieta (Samtiya <i>et al.</i>, 2020). El sistema digestivo de los cerdos carece de la enzima fitasa, por lo que el fitato acumulado impide la absorción de los iones metálicos de la dieta animal mismos que son liberados al medio ambiente con las excretas (Gessler <i>et al.</i>, 2018).

Adaptado de Joudaki *et al.* (2023)

Figura 3. Imagen del complejo de la fitasa y del fitato.



Tomado de Joudaki *et al.* (2023).

Las fitasas se clasifican según el orden en que se liberan los grupos fosfato del ácido fítico (Secco *et al.*, 2017). Estas incluyen la siguiente clasificación, 3 fitasas (EC 3.1.3.8), 4/6 fitasas (EC 3.1.3.26) y 5 fitasas (EC 3.1.3.72).

Por otro lado, hay 3 tipos de fitasas clasificadas como neutras, ácidas y alcalinas: Las ácidas: provienen de algunas bacterias y hongos siendo más activa con pH entre 2,0 y 6,0 aunque las condiciones óptimas son con pH de 4,5 a 6,0 y temperaturas de 45-60 grados celcius (Singh y Satyanarayana, 2015). Las alcalinas: dependen principalmente del Ca para su actividad, la cual se observa dentro del rango de pH de 7 a 10 (Vijayaraghavan *et al.*, 2013). Finalmente, se encuentran las neutras, las cuales se extrajeron del hongo *Aspergillus flavus*, que mostró la mayor actividad a 45 °C y pH 7,0 (Gand & Singh 2015).

También se clasifican de acuerdo con los mecanismos catalíticos para descomponer el ácido fítico en P inorgánico: cisteína fosfatasa (CP), esta se encuentra en microorganismos patógenos, entéricos y de vida libre; la fosfatasa ácida de histidina (HAP) encontrada principalmente en microorganismos entéricos y fitopatógenos, así

mismo la fosfatasa ácida púrpura (PAP) y las fitasas alcalinas β -propulsoras (BPP), las cuales se encuentran en las arqueas, bacterias y eucariotas (Liu *et al.*, 2022). Las HAP se conocen como "fitasas fúngicas", por otro lado, las PAP se encuentran en plantas, hongos y mamíferos, y finalmente las BPP en bacterias, estas últimas se encuentran comúnmente en *Bacillus spp.* (Kazemzadeh *et al.*, 2020).

Las fitasas son generadas por bacterias, levaduras y hongos (Cuadro 3) y pueden ser enzimas unidas a células o intracelulares, para la producción industrial masiva de fitasas se utiliza comúnmente hongos filamentosos como el *Aspergillus spp.*, *Mucor* y *Penicillium spp.* (Klosowski *et al.*, 2020). Por otro lado, los hongos o levaduras que producen fitasas principalmente extracelulares incluyen los siguientes géneros: *Sporotrichum thermophile*, *Penicillium purpurogenum*, *Aspergillus oryzae*, *Humicola nigrescens*, *Aspergillus flavus*, *Zygosaccharomyces*, *Pichia kudriavzevii* y *Sacharomyces cerevisiae*. Estas fitasas fúngicas funcionan a altas temperaturas y su característica es que poseen un amplio espectro de valores de pH para su actividad (Klosowski *et al.*, 2020).

En este sentido, los microorganismos se cultivan mediante fermentación sumergida. Primero se cultiva en un caldo de fermentación líquido, el cual puede utilizarse directamente o someterse a filtración o centrifugación para eliminar partículas sólidas o impurezas, se puede desecar (deshidratar/ Liofilizar) transformándolo en polvo o forma granulada con actividad fitásica para su almacenamiento y venta, pudiendo ser utilizado para formulaciones de alimentos o piensos. Ravindran y Jaiswal (2016), realizaron el extracto enzimático concentrado mediante filtración, ultrafiltración o cromatografía obteniendo concentrado de la enzima fitásica en presentaciones líquida o en polvo deshidratada. Por otro lado, se encapsula la fitasa utilizando soportes sólidos como micro esferas, partículas o fibras, permitiendo una liberación prolongada y su uso en operaciones específicas de procesamiento de alimentos o aditivo para piensos (Rodríguez *et al.*, 2013). La elección del procesamiento depende de factores como la facilidad de manejo, estabilidad durante el almacenamiento, flexibilidad de dosificación y la compatibilidad con el alimento o pienso previsto (Pragya *et al.*, 2023).

En la producción de fitasas bacterianas se utiliza con más frecuencia la fermentación líquida que la fermentación en estado sólido, utilizando bacterias como *Enterobacter spp.*, *Bifidobacterium spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Lactobacillus casei*, *Serratia*, *Bacillus subtilis subsp. subtilis JJBS250*, y *Escherichia coli* (cuadro 3).

Las fuentes vegetales de fitasa en su mayoría son HAP, las cuales se ha encontrado con actividad de fitasa en granos, leguminosas y semillas de oleaginosas, así como en frutas y verduras de uso alimentario, como el aguacate y las hojas de cebolla (Greiner *et al.*, 2002). El trigo, la espelta, el centeno, la cebada y el triticale son ejemplos de granos de cereales con alta actividad de fitasa, que puede superar las 5000 unidades/kg. Se ha alimentado a animales con estos granos y sus subproductos como fuente de fitasa vegetal (Han *et al.*, 1997). Para aprovechar eficazmente la actividad de fitasa inherente a los alimentos vegetales, se pueden utilizar métodos de procesamiento industriales o domésticos, como la germinación, la fermentación y el remojo el cual permite una mayor biodisponibilidad del P al ser ingerido (Porres *et al.*, 2003).

Las fitasas deben tener estabilidad térmica, porque el proceso de producción de alimentos se realiza utilizando mezcladoras, a menudo ocurre a una temperatura de aproximadamente 65–90 °C, con lo cual es importante que mantenga su estabilidad y eficiencia después de sufrir un proceso térmico, como sucede en la mezcla de alimentos para la formulación de dietas en las diferentes etapas de producción, sin embargo, para evitar la inactivación de las fitasas, la enzima puede añadirse al alimento después del procesamiento de la mezcla, en el último momento (Kumar *et al.*, 2012).

Cuadro 4. Avances recientes en huéspedes microbianos para la producción de fitasas comerciales.

BACTERIA	FUENTE GENETICA	GEN	REFERENCIA
<i>P. pastoris</i>	<i>P. Anomala</i>	Pphy	Joshi y Satyanarayana, 2015
<i>P. pastoris</i>	<i>E. coli</i>	aplicación A 1.2	Joshi y Satyanarayana, 2015
<i>P. pastoris</i>	<i>Lilium longiflorum</i>	LIALP2	Joshi y Satyanarayana, 2015
<i>P. pastoris</i>	<i>C. amalonaticus</i>	física 2119	Joshi y Satyanarayana, 2015
<i>P. pastoris</i>	<i>P. lycii</i>	Física	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>P. pastoris</i>	<i>B. subtilis</i>	Física	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>P. pastoris</i>	<i>E. coli</i>	aplicación A	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>P. pastoris</i>	<i>S. termófilo</i>	rSt-Phy	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>P. pastoris</i>	<i>A. Níger</i>	phyA	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>P. pastoris</i>	<i>C. amalonaticus</i>	física	Xiong <i>et al.</i> 2006
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	<i>A. Níger</i>	Física	Erpel y Arce, 2016
<i>P. griseoroseum</i> PG63	<i>P. chrysogenum</i>	phyA	Correa y de Araujo, 2015
<i>L. lactis</i>	<i>E. coli</i>	aplicación A	Bhagat <i>et al.</i> , 2020
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>A. Níger</i>	Phy A	Mo <i>et al.</i> , 2005
<i>B. subtilis</i>	<i>B. subtilis</i>	Física	Potot <i>et al.</i> , 2010
<i>E. coli</i> BL21 <i>pLysS</i>	<i>P. agglomerans</i>	PaPhyC	Ushasree <i>et al.</i> , 2017
<i>E. coli</i> BL21 (DE3)	<i>Y. intermedia</i>	aplicación A	Ushasree <i>et al.</i> , 2017
<i>B. subtilis</i> 168	<i>B. subtilis</i>	Física	Ushasree <i>et al.</i> , 2017
<i>E. coli</i> DH5a	<i>E. sakazakii</i> 4194.4532		Ushasree <i>et al.</i> , 2017

Fuente: Adaptado de Joudaki *et al.* (2023)

4.1. USO DE FITASAS EN CERDOS.

Los animales monogástricos tienen baja actividad de fitasa en su tracto gastrointestinal. Los alimentos para aves y cerdos a menudo se basan en maíz, sorgo y trigo, todos los cuales son ricos en ácido fítico. Por lo tanto, debido a la baja disponibilidad de Pi (fosforo mineral), cationes inorgánicos y moléculas orgánicas, el crecimiento de estos animales puede verse involucrado de manera negativa (Nielsen *et al.*, 2013). Por lo tanto, los alimentos para cerdos y aves de corral deben complementarse añadiendo Pi (Kumar *et al.*, 2016). Para utilizar las fitasas en la industria alimentaria, necesitan ser estables y poder funcionar a pH gástrico y deben sobrevivir al proceso digestivo hasta cierto punto. Las fitasas microbianas también se utilizan a veces en alimentos para peces (Kumar *et al.*, 2012).

La cantidad de P disponible para ganado porcino en un ingrediente alimenticio se determina generalmente por su biodisponibilidad relativa en ese ingrediente. Los valores de Digestibilidad Aparente Total (DAT) del fosforo dependen de la cantidad de P en la dieta debido a que las pérdidas endógenas de P contribuyen en mayor proporción a la excreción fecal cuando el P se incluye a bajos niveles que cuando se incorporan dosis elevadas (Stein, 2011).

Cuadro 5. Modo de acción y efecto principal en fitasas utilizadas en dietas para cerdos en la fase de destete.

Etapas productivas	Modo de acción	Efectos Principales	Referencia
Destete	Mejora la DIA de MS, EB, PC, almidón, NSP, Ca, P, inositol hexafosfato (IP6), algunos aminoácidos (AA, leucina, lisina, fenilalanina, alanina, cisteína, isoleucina, treonina, asparagina y serina) y fitato. ATTD de MS, EB, PC, almidón, NSP, fitato, Ca, P, Na, K, Mg y Zn, así como en la retención de Mg y Zn.	-Aumenta GDP, CMS y Relación G:F. Fuerza ósea y concentraciones plasmáticas de fósforo. -Disminuye la excreción fecal de P. Concentración de Calcio en plasma, así como la actividad de la fosfatasa alcalina en plasma y hueso.	Omogbenigun <i>et al.</i> 2004; Zeng <i>et al.</i> 2014; Yáñez <i>et al.</i> 2013; Zeng <i>et al.</i> 2011
Crecimiento	Mejora la DIA de MS lisina, treonina, serina, isoleucina, asparagina y valina. ATTD de P, Ca, MS, EB, leucina, lisina, fenilalanina, alanina y cisteína.	-Aumenta GDP, ICA y Relación G: F. -Disminuye la GDP y la excreción fecal de P. La concentración plasmática de calcio, así como la actividad de la fosfatasa alcalina plasmática y ósea.	Nortey <i>et al.</i> 2007; Kim <i>et al.</i> 2008; Zeng <i>et al.</i> 2011; Woyengo <i>et al.</i> 2016
Finalización	Mejora la digestibilidad del P.	-Aumenta el GDP y el Ca. -Disminuye la excreción de P.	Olukosi <i>et al.</i> 2007

Adaptado de Aranda *et al.*, (2021).

DIA: digestibilidad ileal aparente; MS: materia seca; EB: energía bruta; PC: proteína cruda; NSP: polisacáridos no amiláceos; AA: aminoácidos; ATTD: Digestibilidad total aparente del tracto; GDP: Ganancia diaria promedio de peso. CMS: ingesta diaria promedio de alimento; Relación G: F: ganancia /alimentación. ICA: índice de conversión alimenticia; PC: proteína cruda; DMS: Digestibilidad de la materia seca; GDP: ganancia diaria de peso.

Las fitasas se suplementan de la misma manera en todas las etapas productivas de los cerdos (Cuadro 5), al igual que otras enzimas exógenas comerciales, con un mayor reporte en las etapas de destete y crecimiento.

La fitasa en las dietas de cerdos se añade generalmente a 500 FTU /kg, pero se hidroliza menos del 50% del fitato de la dieta (Dersjant-Li *et al.* 2017). Por lo tanto, es necesario incluir niveles mayores en la dieta para hidrolizar más del 60% del fitato, reducir sus efectos anti nutricionales y mejorar la eficiencia del uso del fósforo orgánico (Dersjant-Li *et al.* 2014). Adeola y Cowieson, (2011) mencionan que un nivel de inclusión de fitasa mayor a 2,500 FTU/kg de alimento caracteriza una dosis alta de inclusión de fitasa. La eficacia depende de varios factores, como la etapa de crecimiento del cerdo, el tipo de dieta y la fuente de fitasa (Jongbloed *et al.* 2004).

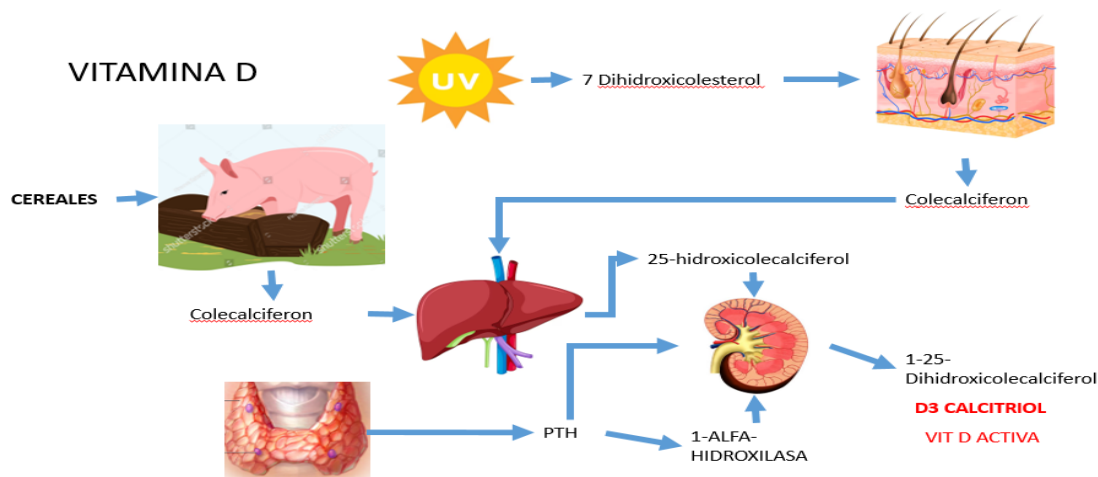
Algunos autores reportan variables productivas en el rendimiento de cerdos con el uso de fitasa en la dieta (Cuadro 4). En la etapa de destete, Zeng *et al.* (2014), reportaron en promedio un GDP promedio de 0,504 kg/d, y un promedio en el consumo de alimento en materia seca (CMS) de 0,76 kg/d y una relación ganancia / consumo de alimento (G:F) de 0,665 kg/kg. Yáñez *et al.* (2013), reportaron en promedio un GDP de 0,515 kg/d, un CMS de 0,72 kg/d (Cuadro 4). En la etapa de crecimiento, Zeng *et al.* (2011), reportaron en promedio un GDP de 0,549 kg/d, un CMS de 0,907 kg/d y un Digestibilidad de la Materia seca (DMS) de 86,23% (Cuadro 4). En la fase de finalización, Olukosi *et al.* (2007a) obtuvieron una GDP de 0,488 kg/d, un CMS de 1,165 kg/d, una relación G: F de 0,425 kg/kg y una DMS del 80,2%.

4.2. METABOLISMO DE LA VITAMINA D EN CERDOS

Dentro de la retroalimentación del P, tenemos otros metabolitos como vitamina D (Figura 4) y la hormona paratiroidea (PTH) con FGF23 (Factores de crecimiento fibroblástico), los cuales actúan como componentes críticos en la regulación de la homeostasis del P, independiente de la función renal e identificando al hueso como un tejido con funciones endocrinas. La PTH estimula la liberación de calcio desde los huesos y aumenta la

reabsorción de calcio en los riñones, recordando que cuando se moviliza calcio se moviliza P (Crenshaw y Rortvedt-Amundson 2014) (Figuras 4 y 5).

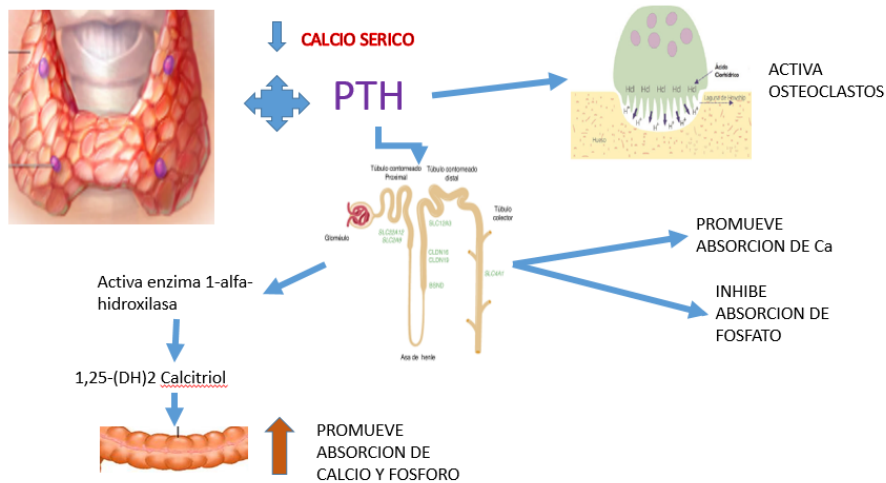
Figura 4. Función y producción de la vitamina D.



Cita: Adaptado de Carmeliet *et al.* (2015)

La vitamina D₃ (colecalciferol) es producida por la piel mediante su exposición a los rayos UV y puede obtenerse en la alimentación principalmente de cereales. En la piel se produce mediante la exposición a la luz convirtiendo al 7- dihidrocolesterol (proviene del colesterol) en colecalciferol, el cual es la forma inactiva de esta vitamina D. El colecalciferol es transformado en 25 dihidroxicolecalciferol en el hígado por la enzima 25 hidroxilasa para finalmente ser transformado en el riñón mediante la enzima 1-alfa-hidroxilasa en calcitriol, que es la forma activa de la vitamina D (Carmeliet *et al.*, 2015).

Figura 5. Relación de calcio y la parathormona (PTH).



Cita: Adaptado de Santiago (2020)

La parathormona o PTH, es una hormona secretada por la glándula paratiroides cuando bajan los niveles de calcio en sangre, en hueso activa a los osteoclastos que mediante resorción ósea aumenta los niveles de calcio y fosforo sérico. En el túbulo distal del riñón la PTH promueve la reabsorción de calcio y en el túbulo proximal disminuye la absorción de fosfato por ende hay aumento de fosfato en la orina. La PTH en el riñón aumenta los niveles de calcitriol estimulando la enzima 1-Alpha hidroxilasa para promover la absorción de calcio y P en el intestino (Santiago, 2020).

Así, en lechones cuya dieta se enriqueció con vitamina D, se indujo la síntesis de FGF23 (el cual es una proteína que desempeña diversos procesos biológicos, como la proliferación celular, la diferenciación, la reparación de tejidos y el desarrollo embrionario entre otros), medida por un aumento en la expresión del mRNA de FGF23, en especial cuando el P estuvo en abundancia, pero estos resultados también indican que FGF23 en exceso puede desactivar a los metabolitos de la vitamina D, llegando incluso a una situación de deficiencia de la vitamina (aun cuando se haya adicionado a la dieta)

(Crenshaw y Rortvedt-Amundson 2014). Este escenario se presentará cuando el P esté en exceso, que puede suceder por un uso inapropiado de fitasa, o en combinación con ingredientes con mayor contenido de P, los cuales pueden reducir en estos casos la eficiencia de uso del P, por tal motivo, las fitasas juegan un papel importante en la absorción del ácido fítico, el cual influye directamente en el fosforo digestible y por ende en la regulación de la PTH y el FGF23 (Crenshaw y Rortvedt-Amundson, 2014).

5. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, existe una problemática a nivel mundial en la producción porcina debido a que la alimentación de los cerdos representa el mayor costo de producción (75%), y se basa principalmente a base de granos de cereales como maíz, sorgo y legumbres como la soya. Sin embargo, al ser el cerdo un animal monogástrico que no produce enzimas endógenas capaces de digerir los polisacáridos sin almidón (NSP) presentes en la dieta, aumenta la viscosidad de la digesta, se altera la morfología epitelial del intestino y se reduce la digestibilidad de los nutrientes. Por otro lado, el uso de fitasas exógenas incrementa la absorción de fosforo en la dieta, mejorando sus parámetros productivos en cerdos en destete.

Existen enzimas exógenas en la alimentación de cerdos que han sido estudiadas para su inclusión en la dieta en diferentes etapas productivas (destete, crecimiento y finalización), mejorando el rendimiento productivo y que recientemente han progresado e impactado en la última década debido a que su desarrollo indica que cuando se utilizan en los piensos se produce un ahorro en la compra de alimentos.

Por lo cual, se requiere evaluar el papel que cumple la inclusión de fitasas (dosis) en la alimentación porcina en la etapa de destete, sobre el consumo de alimento (CMS; g/d), ganancia diaria de peso (GDP; g/d), conversión alimenticia (CA) y digestibilidad de la materia seca (DMS).

6. OBJETIVOS

6.1. General

Resumir el conocimiento actual sobre el uso de fitasas exógenas en cerdos en destete, para mejorar el rendimiento productivo, con respecto a su modo de acción y efectos.

6.2. Específicos

Encontrar el efecto de la administración de fitasa en el rendimiento productivo de los cerdos en destete.

Evaluar las variables productivas (Consumo de Alimento, CMS), ganancia diaria de peso, (GDP) y eficiencia alimenticia (EA, kg consumo/ kg de GDP) que mejoran con la suplementación de fitasas exógenas en la etapa de destete.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Estrategia de búsqueda y criterios de selección

Nuestra búsqueda de información se centró en los estudios que informan del uso de enzimas exógenas (fitasas) en las dietas para cerdos. Se creó una base de datos con los estudios que especifican el uso de fitasas en las dietas para cerdos y los artículos utilizados abarcaron los años 1997 a 2024. Las publicaciones se obtuvieron de bases de datos como World Wide Science, Science Direct, Scopus, Springer Link, Wiley Online Library, Dialnet, SciELO, ScienceResearch, PubMed, Redalyc, Google Academic y ERIC. La obtención de información para encontrar publicaciones relevantes se basó en una cadena de temas específicos, fitasas utilizadas en los cerdos.

La cadena de búsqueda con el tema concreto se apoyó en operadores booleanos ("and", "or", "and not"), para especificar la información requerida. Todos los términos de búsqueda dentro de una cadena se comprobaron con un "título, resumen y palabra clave". Las palabras clave utilizadas fueron: cerdos, enzimas exógenas, modo de acción, efectos, rendimiento productivo, tratamiento (control vs enzima o Fitasa), etapa de producción del cerdo (destete), dosis de enzima en la dieta (g/kg), ganancia diaria promedio de peso (GDP kg/día), relación ganancia de peso: Consumo de alimento (relación G: F, kg/kg), ingesta diaria promedio de alimento (CMS, kg/día) y digestibilidad de la materia seca (DMS %). Así mismo la búsqueda en inglés: phytases, diet, feed, nutrition, pigs, piglets, pig production. Por ejemplo, en la base de Scopus se colocaron las palabras: phytases AND weaning OR pig AND gain AND intake, y posteriormente una vez revisados los datos de los artículos se capturo la información en la base de Excel, y cada uno de los valores se homogenizo en la base de datos para poderse calcular: Dosis de la enzima fitasa en la dieta (g/kg), GDP (kg/día), relación G:F (kg/kg), CMS (kg/día) y DMS (%).

Lo ensayos cumplieron los siguientes criterios de inclusión (a) estudios publicados en una revista científica internacional revisada por pares, (b) especificar el procedimiento de asignación aleatoria de los animales a cada tratamiento (diseño experimental), (c) informar medias al cuadrado y una medida de variabilidad, y (d) informar del tamaño de

la muestra a cada grupo. Sólo se incluyó en el análisis aquellos estudios que informaron sobre la composición química, la dosis de enzima en la dieta (g/kg), el GDP (kg/día), la relación G: F (kg/kg), el CMS (kg/día) y la DMS (%).

La base de datos final comprende información de medias de mínimos cuadrados, medidas de variabilidad, error estándar de la media (SEM), error estándar de las diferencias (SE) o desviación estándar (SD) y número de unidades experimentales para ambos grupos (control vs tratamiento) para cada variable de salida.

Las publicaciones que se eliminaron o no se consideraran en el presente estudio, fue porque no presentan suficientes datos y valores requeridos: cerdos, enzimas exógenas, modo de acción, efectos, rendimiento productivo, tratamiento (control vs enzima), etapa de producción del cerdo (destete), dosis de enzima en la dieta (g/kg), GDP (kg/día), relación G: F (kg/kg), CMS (kg/día) y DMS (%), número de animales, grupo control vs tratamiento, por ejemplo, algunos artículos muestran que se adicionaron fitasas a la dieta, pero no indican como se menciona anteriormente la dosis en el tiempo o el peso de los animales, situación por la cual no se consideraron en el presente estudio.

La información se obtuvo de 12 artículos publicados entre 2003 y 2019, sobre los que se obtuvo información relevante específicamente de cerdos en la etapa de destete, suplementados con fitasas: Omogbenigun *et al.*, 2003; Olukosi *et al.*, 2007; Kim *et al.* 2008; Yáñez *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2011; Zeng *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2015; De Faria *et al.*, 2015; Nortey *et al.*, 2015; Woyengo *et al.*, 2016; Dersjant-Li., 2018; Cheng *et al.*, 2019.

7.2. Desarrollo estadístico

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de la composición química de las dietas y de las dosis de enzimas, número de animales, dosis de enzimas en la dieta, peso corporal inicial, ingesta diaria promedio de alimento, ganancia diaria promedio de peso, relación ganancia: alimento, digestibilidad de la materia seca, para determinar el efecto de las cepas de la enzima sobre esas variables. Los conjuntos de datos se analizaron en busca de bifurcaciones calculando índices básicos como el número de estudios. El análisis se repitió para la longitud de cada segmento con análisis estadísticos como la media, el mínimo, la longitud máxima, la desviación estándar y el coeficiente de variación. El análisis se realizó con el software estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2004). El análisis para la obtención de medias fue con la prueba F de Fisher y la comparación de medias con la prueba de Tukey.

En el análisis actual, se ajustaron modelos de efectos aleatorios, para estimar el tamaño del efecto (ES), el intervalo de confianza del 95% y la significación estadística del ES para cada variable de resultado, utilizando el paquete "meta" versión 4.6-0 (Schwarzer *et al.*, 2015) en el software estadístico R versión 3.3.1 (R Core Team, 2016). El ES se calculó como diferencia de medias estandarizada (DME) utilizando los métodos descritos por Hedges, (1981) para los efectos fijos y DerSimonian y Laird (2015) para los modelos de efectos aleatorios. A los estudios que informen de las variables de resultado en la misma unidad de medida se les calculó la diferencia de medias bruta (DMP), que permite la interpretación del tamaño del efecto, bajo las unidades de medida originales (Appuhamy *et al.*, 2013). La heterogeneidad de los resultados entre los ensayos se informa mediante la estadística I^2 (Higgins y Green 2011). El I^2 representa la proporción aproximada de la variabilidad total en las estimaciones puntuales que puede atribuirse a la heterogeneidad, que se calcula como:

$$I^2 = \frac{Q - k - 1}{Q} \times 100$$

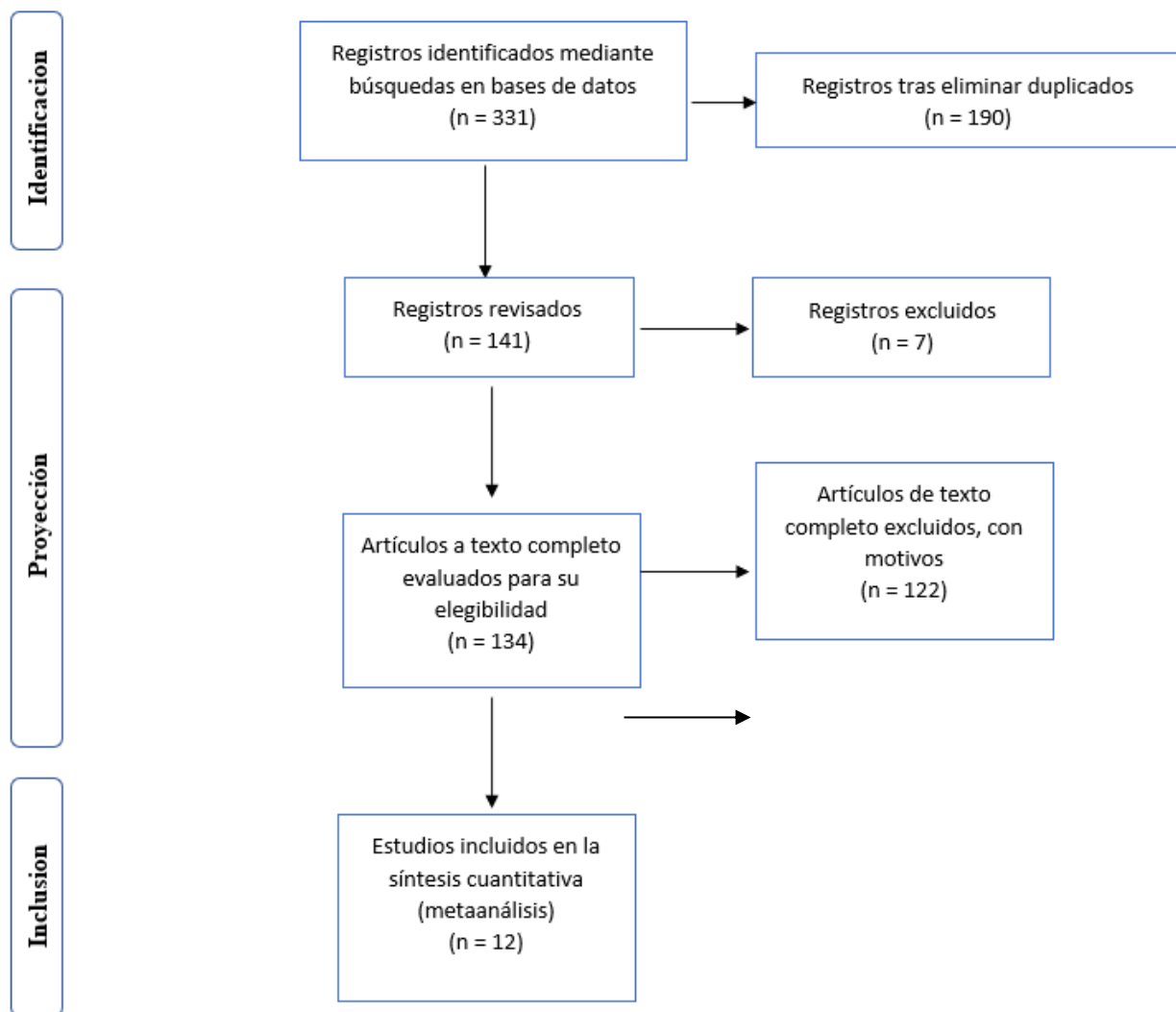
Donde Q es el estadístico de heterogeneidad, X^2 y k es el número de ensayos. Los valores de I^2 de 25, 50 y 75% representan niveles de heterogeneidad pequeños,

moderados y altos, respectivamente. Para las variables de salida que muestren una heterogeneidad sustancial ($I^2 > 50\%$) se construirán modelos de regresión de efectos mixtos (análisis de meta regresión) para explorar las fuentes de heterogeneidad.

8. RESULTADOS

La búsqueda de información de acuerdo con la Figura 6, que es el PRISMA, nos muestra que originalmente se encontraron un total de 331 artículos, al meter las diferentes palabras de búsqueda con sus conectores, posteriormente se redefinió la búsqueda de información y se obtuvieron 134 artículos, de ellos se eliminaron 122 por que no tenían la información requerida o en su caso se trataba de ensayos en cuadrado latino o un análisis factorial, o no especificaba el diseño estadístico, el cual debe de ser un diseño completamente al azar , no definía la raza del cerdo, la dosis de la enzima o venía con la combinación de varias enzimas perdiendo el efecto de la fitasa como única fuente de suplementación en los estudios, por lo tanto se obtuvo un total de 12 estudios en cerdos en destete, es importante mencionar que se planteó originalmente el efecto de fitasas en las diferentes etapas de producción (destete, crecimiento, finalización) sin embargo, se obtuvieron muy pocos datos en las últimas dos etapas en el estado puro de la fitasa como suplemento, lo cual no permiten hacer un metaanálisis del mismo, y por lo anterior, solo se consideró el estudio en cerdos en destete.

Figura 6. Diagrama de flujo PRISMA de la revisión sistemática, desde la búsqueda inicial y el cribado hasta la selección final de las publicaciones que se incluirán en el metaanálisis de la inclusión de fitasas en cerdos en destete.



Dentro de la búsqueda de información se registraron las razas de cerdos a estudio, en el Cuadro 5, se muestran las razas de cerdos en destete a estudio suplementados con fitasas exógenas (Zeng *et al.*, 2011, 2014 y 2015), con una cruce de Duroc X Landrace X Large White, debido a la combinación de características deseables, son las líneas más importantes en la producción porcina por la calidad de carne, prolificidad y eficiencia alimentaria. Dersjant-Li *et al.* (2008) utiliza para su estudio cerdos de la raza Newsham Choice que se refiere a la cruce de Duroc X Landrace X Large White.

Cuadro 6. Estudios realizados en las razas de cerdos en destete suplementados con fitasas exógenas.

Raza de cerdo	Referencia
Duroc X Landrace X Large white	Zeng et al. 2011; Zeng et al. 2014; Zeng <i>et al.</i> 2015; Dersjant-Li <i>et al.</i> , 2008
Large White X Duroc	Yáñez et al. 2013; Nortey et al., 2015
Hampshire×Duroc×Yorkshire×Landrace	Olukosi <i>et al.</i> , 2007
Cotswold	Omogbenigun <i>et al.</i> , 2003

Cuadro 7. Tamaño del efecto y heterogeneidad para el uso de fitasas en cerdos en destete.

Efecto del tamaño								Heterogeneidad		
Variables	Pruebas (n)	Control medio (DS) ^a	RMD (95% CI) ^b	P-value	DMS (95% CI) ^c	P-value	I ² (%)	P-value	P-value ^d	
Ganancia diaria de peso (GDP)	23	0.57 (0.21)	+0.03 (+0.01, +0.06)	0.004	+0.35 (+0.07, +0.63)	0.01	84.2	0.001	0.85	
Consumo de materia seca (CMS)	23	1.17 (0.59)	+ 0.01 (-0.005, +0.03)	0.13	+ 0.09 (-0.01, +0.21)	0.09	38.8	0.03	0.41	
Relación Consumo Ganancia (Rel C:G)	20	0.56 (0.11)	+0.013 (+0.006, +0.02)	0.0005	+0.15 (+0.08, +0.22)	0.0001	8.4	0.35	0.79	

^a Media y desviación estándar del grupo sin suplemento de fitasa.

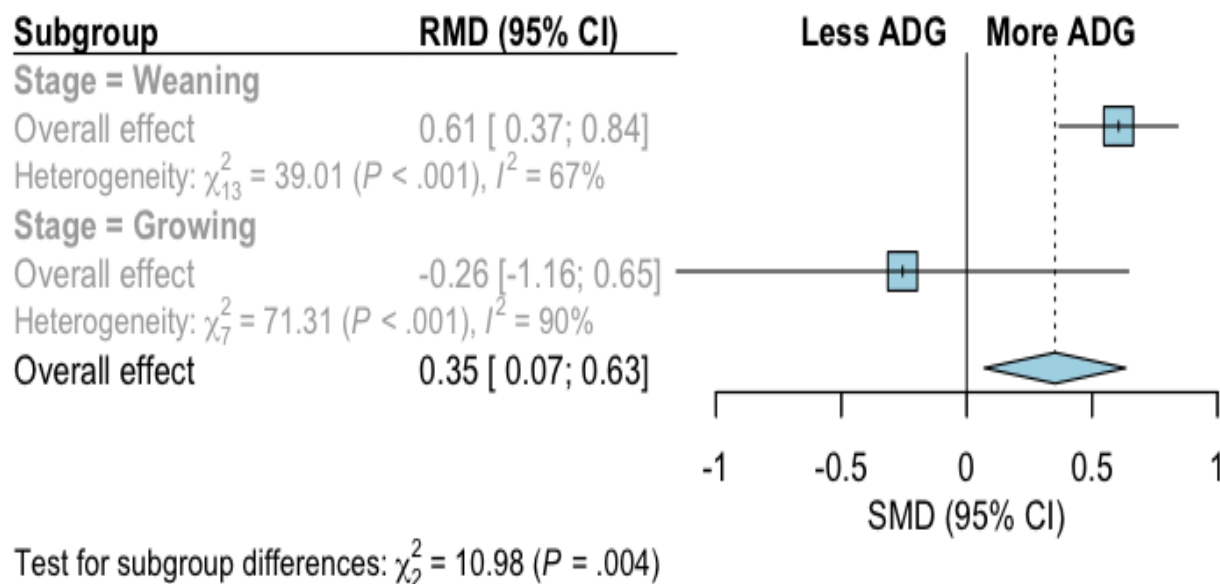
^b RMD es la diferencia de medias bruta que estima el efecto global expresado en las medidas unitarias originales.

^c Es la diferencia de medias estandarizada estimada del modelo aleatorio.

^d Valor P de la prueba de Begg; valores P > 0,05 significa la presencia de un sesgo de publicación significativo.

I² es la medida de heterogeneidad del modelo aleatorio.

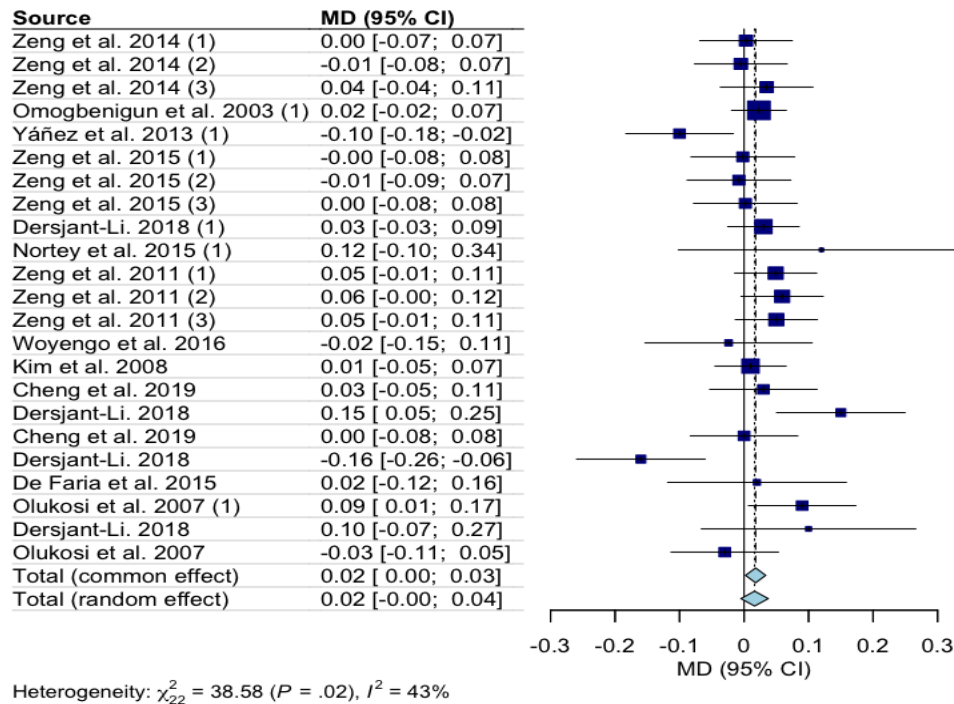
Figura 7. Diagrama de bosque de la ganancia diaria de peso (kg/d) de los estudios de fitasa en cerdos en destete.



El tamaño del punto refleja la ponderación relativa del estudio respecto al tamaño del efecto global estimado, donde un tamaño del punto mayor representa una mayor ponderación y el tamaño del efecto combinado estimado, incluidos los intervalos de confianza. El rombo representa el efecto global de la diferencia de medias brutas (DMP).

En el cuadro 7 y figura 7, se presenta el análisis de 23 estudios sobre el efecto en la ganancia diaria de peso (kg/d), con respecto a la adición de fitasas y su grupo control, en el cual se observan un efecto significativo con la adición de fitasas en la dieta ($P < 0.004$), incrementándose la ganancia de peso en cerdos en destete suplementados con fitasas.

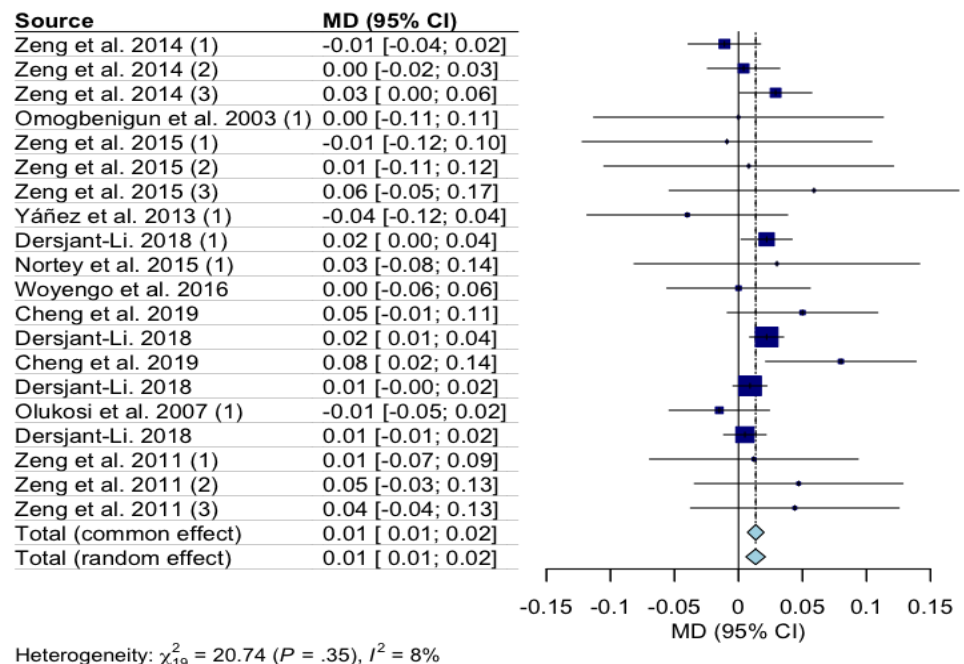
Figura 8. Diagrama de bosque del consumo de materia seca (kg/d) a partir de estudios con fitasa en cerdos en destete.



El tamaño del punto refleja la ponderación relativa del estudio respecto al tamaño del efecto global estimado, donde un tamaño del punto mayor representa una mayor ponderación y el tamaño del efecto combinado estimado, incluidos los intervalos de confianza. El rombo representa el efecto global de la diferencia de medias brutas (DMP).

En el Cuadro 7 y figura 8 se presenta el efecto en el consumo de materia seca (kg/d), con respecto a la adición de fitasas y su grupo control en dietas para cerdo al destete, en el cual no se observan diferencias significativas ($P > 0.13$) por la adición de fitasas en la dieta.

Figura 9. Gráfico de relación consumo de alimento: ganancia de peso a partir de estudios con fitasa en cerdos en destete.



El tamaño del punto refleja la ponderación relativa del estudio respecto al tamaño del efecto global estimado, donde un tamaño del punto mayor representa una mayor ponderación y el tamaño del efecto combinado estimado, incluidos los intervalos de confianza. El rombo representa el efecto global de la diferencia de medias brutas (DMP).

En el cuadro 7 y figura 9, se presenta el efecto en la relación consumo de alimento ganancia de peso (relación F: G, kg/d), con respecto a la adición de fitasas y su grupo control, en cerdos al destete, en el cual se observa un efecto significativo ($P < 0.005$), con la adición de fitasas, al incrementar la eficiencia alimenticia.

9. Discusión

9.1 Razas de cerdos

Dos Santos *et al.* (2023), evaluaron el efecto de diferentes porcentajes de genes Duroc en los cruces (5, 50 y 100%) con otras razas, y su interacción sobre los rasgos de crecimiento, canal y calidad de la carne de los cerdos. Los animales cruza (50% Duroc) presentaron un mayor consumo medio diario de alimento y peso en canal caliente, pero un menor rendimiento cárnico en comparación con los animales cruza (5% Duroc) y de raza pura (100% Duroc) ($P < 0,05$). Los animales de raza pura (100% Duroc) presentaron el menor espesor de grasa dorsal y subcutánea, y la mayor profundidad muscular y rendimiento cárnico ($P < 0,05$). La desventaja de utilizar razas puras de acuerdo con Dos Santos *et al.* (2023), es que los animales de raza pura (100% Duroc) requirieron más medicación durante la producción ($P < 0,05$), por lo anterior los estudios realizados por Zeng *et al.* (2011; 2014; 2015), Dersjant-Li. (2008), utilizan cruzamientos de las razas Duroc X Landrace X Large white, que permite una mejor conversión y eficiencia alimenticia.

Así mismo, Kuhlers *et al.* (1989) realizan estudios con diferentes cruzamientos de Duroc-Landrace, Yorkshire-Landrace and Hampshire-Landrace, los cerdos cruzados con tres razas, las cuales pesaban 0,9 kg más a los 56 días, crecían 0,039 kg/día más rápido y tardaban 7 a 9 días menos en alcanzar los 100 kg de peso vivo, razón por la cual se prefieren utilizar tres cruzamientos actualmente para razas comerciales en este tipo de estudios.

Los cerdos de la raza con línea paterna Hampshire tuvieron menores tasas de supervivencia a los 21 días y a los 100 kg de peso vivo, con respecto a los nacidos vivos ($P < 0,10$), en comparación con los cerdos nacidos de machos Duroc y Yorkshire. La eficiencia alimenticia fue más deseable en corrales de cerdos engendrados por sementales Hampshire y Duroc en comparación con corrales de cerdos engendrados por líneas paternas Yorkshire (López y Galindez, 2011).

La heterosis es una herramienta utilizada para aumentar la productividad de los animales de granja sumando las mejores características de cada raza, la raza Large white tiene

habilidades para destetar camadas con un mejor peso, así como una tasa de mortalidad de los lechones baja con respecto a otras razas, hasta el destete siendo una característica netamente genética y particular de la raza, un producto de la constitución genética de la misma. Es por ello que se recomienda utilizar cerdas cruzadas Landrace x Large White, como los que se utilizaron en el presente metaanálisis (López y Galindez, 2011).

9.2 Ganancia diaria de peso

La ganancia diaria de peso (GDP) en cerdos es un parámetro productivo que indica cuánto aumenta el peso (kg/d) de un animal en un día, y esto dependerá de factores del animal, como la raza, sexo, estado productivo del animal , estado fisiológico, y factores del alimento (Contenido de energía, fibra, proteína, aminoácidos, etc.) que cubra sus requerimientos nutricionales en función de su etapa fisiológica, y un factor más a considerar será la digestibilidad de los alimentos y su concentración energética y finalmente tendremos factores ambientales como el clima (temperatura, humedad, índice ITH; radiación solar entre otros), que pueden hacer que el consumo de alimento varíe y por consecuencia no se vea reflejada la ganancia de peso estimada (Villagómez , 2020)

Para mejorar la digestión de los nutrientes, se recomienda añadir fitasa al alimento de los cerdos en dosis de 250 a 500 FTU (unidades de fitasa) por kilogramo de alimento. En los estudios analizados, las dosis varían desde 10 FTU por kg (según De Faria *et al.*, 2015) hasta 20,000 FTU (según Zeng *et al.*, 2014 y Omogbenigun *et al.*, 2003). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones sugieren que un rango de 250 a 600 FTU es lo más común y efectivo (Olukosi *et al.*, 2007, Dersjant-Li. 2018; Zeng *et al.*, 2011; Zeng *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2015; Omogbenigun *et al.*, 2003; Yáñez *et al.*, 2013; Nortey *et al.*, 2015).

El uso de más de 500 FTU puede aportar beneficios adicionales, ya que, según los estudios, aunque no aumenta el consumo de alimento, sí mejora la ganancia de peso de los cerdos (Yáñez *et al.*, 2013; Nortey *et al.*, 2015).

Un factor clave a considerar es la cantidad de calcio en la dieta, ya que este mineral puede reducir la efectividad de la fitasa. Esto sucede porque el calcio se une a los fitatos, haciendo que sean más difíciles de descomponer por la fitasa. Un punto a mencionar es que el uso adecuado de fitasa (dosis adecuada) en la alimentación de cerdos mejora la absorción de P, favoreciendo un mejor crecimiento sin necesidad de aumentar el consumo de alimento (Abdollahi *et al.*, 2016).

Es importante la dosis de la fitasa administrada en el alimento ya que de ello depende la efectividad, cantidades inadecuadas pueden ser ineficaces. En el presente estudio se pudo encontrar que la dosis de fitasas es muy variado, los cuales van desde 10 FTU hasta 20,000 FTU por kilogramo de alimento, lo que indica que no existe un estándar único para su aplicación. Dosis demasiado bajas (como 10 FTU) pueden ser insuficientes para liberar el fósforo ligado a los fitatos, reduciendo la absorción de nutrientes esenciales. Por otro lado, dosis extremadamente altas (hasta 20,000 FTU) podrían no generar beneficios adicionales y aumentar costos innecesariamente. Encontrar el equilibrio adecuado en la suplementación de fitasas es clave para optimizar la digestión de nutrientes, mejorar el crecimiento y garantizar la eficiencia alimentaria en cerdos en etapa de destete (Abdollahi *et al.*, 2016).

9.3 Consumo de alimento

La preferencia o aversión de los animales por un determinado alimento o nutriente es una expresión conductual desarrollada por un complejo sistema biológico en el que intervienen diferentes órganos y retroalimentaciones sensoriales, metabólicas. Varios estudios han confirmado que los cerdos tienen la capacidad de seleccionar entre ingredientes y/o nutrientes de la dieta, por ejemplo, tipos de cereales y aminoácidos, aunado a formular con aminoácidos esenciales para un mejor desempeño productivo de los animales, también se ha observado que los cerdos modulan sus preferencias alimentarias en situaciones de déficit de nutrientes para restablecer la homeostasis (Villagómez, 2020).

La falta de fitasa en el intestino animal hace que los cerdos al igual que otros monogástricos, sean incapaces de absorber fósforo y minerales de su dieta, de aquí la

importancia de formular correctamente no solo para P y calcio, pero en realidad se debe de formular para todo el perfil de minerales que requiere el animal en su etapa de producción, dado que el fitato es un compuesto con una fuerte carga negativa presente en un amplio rango de pH, su presencia en la dieta reduce la biodisponibilidad de iones minerales divalentes y trivalentes (Fredlund *et al.*, 2006).

Por otro lado, la formación de complejos proteicos de fitato reduce la actividad enzimática, la solubilidad y la susceptibilidad proteolítica de las proteínas. Por lo tanto, el fitato se considera un compuesto anti nutriente, posiblemente se ve más afectado en cerdos en las etapas de crecimiento y finalización. Y por ello no se aprecia un efecto positivo tan marcado con el uso de fitasas en esta etapa estudiada (Cuadro 4), a diferencia de la etapa de destete, donde las dietas vienen formuladas con un porcentaje de proteína (16 %) superior con respecto a las etapas de crecimiento y finalización (National Research Council, 2012), esto haría suponer que en estas últimas etapas se debe de replantear el contenido de proteína en las dietas cuando se adicionan fitasas, para que no se vea afectada la ganancia de peso de los animales. Futuros estudios deberán evaluar esta consideración, aunado a ello hay pocos estudios que se han desarrollado en etapas de crecimiento (Woyengo *et al.* 2016; Cheng *et al.* 2019, Dersjant-Li. 2018) y finalización con la adición de fitasas como fuente única (Olukosi *et al.*, 2007 y Dersjant-Li, 2018).

Las fitasas mejoran la digestibilidad y absorción de nutrientes, no alteran el sabor, textura o palatabilidad del alimento. En el presente estudio, se menciona que no se vio afectado el consumo de alimento por la adición de fitasas, al no obtenerse cambios significativos ($P>0.05$), pero si mejora la ganancia diaria de peso (GDP) y la Relación ganancia/consumo de alimento (relación G: F); por lo tanto, existe una mejora en la conversión alimenticia obteniendo mayor ganancia con la misma cantidad de alimento. Esto indica que las fitasas no afectan la digestibilidad de la dieta ofrecida, pero si influye en su utilización, haciendo que el consumo de fitasas mejore la absorción del P e incremente su utilización y por consecuencia mejora los parámetros productivos del animal (Villagómez *et al.*, 2020).

Los resultados de la digestibilidad de la energía con las fitasas son poco consistentes, además de que los datos de mejora de digestibilidad de la energía entre fitasas es variable, como se comentó anteriormente, las fitasas pueden disminuir la eficiencia de utilización de las proteínas y más específicamente de los de los aminoácidos por ello es importante en la formulación de las dietas considerar el aporte energético y proteico de alimentos con una mejor biodisponibilidad y así incrementar su aporte para que se vea reflejado en una mejor ganancia de peso al administrar fitasas en la dieta (Cadogan *et al.*, 2023).

El uso de calcio y fitasas en la alimentación de los cerdos mejora la digestión y absorción del P y el calcio de manera progresiva (Zhai *et al.*, 2023). Algunos estudios han demostrado que esta suplementación favorece la digestibilidad de los nutrientes en la dieta, lo que contribuye a una mayor ganancia de peso sin afectar el consumo de alimento. Sin embargo, es fundamental mantener un equilibrio adecuado entre calcio y fósforo en la dieta para asegurar una absorción eficiente del P sin interferencias (Zhai *et al.*, 2023).

Cuarón, (2015), menciona que el uso de fitasas no altera los requerimientos, y aumenta la digestibilidad de P en los ingredientes, debido a que las fitasas no alteran la excreción endógena. En este sentido recientes estudios demuestran que, si se afecta la eficiencia

de utilización de la energía y la proteína con la adición de fitasas en la dieta, por lo cual recomienda incrementar el aporte de energía y proteína, cuando se administren fitasas para poder ver un efecto positivo con la administración de estas enzimas (Zhai *et al.*, 2023).

9.4 Relación consumo de alimento: ganancia de peso

La administración de fitasas exógenas en la alimentación en cerdos destetados muestra cambios positivos en la ganancia diaria de peso y la relación (F: G); sin incrementar el consumo diario de alimento mejorando la eficiencia alimenticia debido a que ayuda liberar el P ingerido en la dieta en forma de fitato. Una absorción adecuada de P es fundamental para maximizar el desarrollo muscular y crecimiento de los cerdos destetados ya que los animales jóvenes en crecimiento tienen mayores requerimientos de P debido a la rápida formación de huesos y tejidos (Selle y Ravindran, 2008).

La inclusión de fitasas exógenas en la alimentación de cerdos destetados ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar su rendimiento productivo. Uno de los principales beneficios de esta suplementación es el aumento en la GDP y la mejora en la relación F:G lo que indica que los cerdos aprovechan mejor los nutrientes de su dieta sin necesidad de incrementar el consumo de alimento. Esto se traduce en una mayor eficiencia alimenticia, permitiendo que los animales alcancen su máximo potencial de crecimiento de manera más rápida y con menores costos de alimentación (Villagómez *et al.*, 2020).

El mecanismo detrás de este efecto positivo radica en la capacidad de la fitasa para liberar el P presente en la dieta en forma de fitato, un compuesto que los cerdos no pueden digerir eficientemente por sí solos. Sin la acción de la fitasa, gran parte del P en los ingredientes vegetales se desperdiciaría en las excretas, reduciendo su disponibilidad para el crecimiento del animal y generando problemas ambientales debido a la acumulación de fósforo en los desechos (Knochel *et al.*, 2006).

La absorción adecuada de fósforo es un factor clave en el desarrollo de los cerdos destetados, ya que este mineral es esencial para la formación de huesos, músculos y otros tejidos en animales jóvenes en crecimiento. Durante esta etapa, los requerimientos de fósforo son elevados debido a la rápida síntesis de estructuras óseas y musculares. Un suministro insuficiente de fósforo podría afectar negativamente la salud y el crecimiento del cerdo, comprometiendo su desarrollo y eficiencia productiva (Selle y Ravindran, 2008).

10. Conclusiones

En el presente metaanálisis, se observa que la adición de fitasas exógenas en cerdos en destete influye favorablemente la ganancia diaria de peso y la relación consumo de alimento: ganancia de peso, sin verse afectado el consumo de alimento, con una dosis en promedio de 500 FTU de fitasas en la dieta, sin embargo, este efecto se mantiene incluso administrando dosis de hasta 20000 FTU.

La administración de fitasas exógenas en la alimentación de cerdos destetados optimiza la digestión y utilización del fósforo, mejora el crecimiento sin aumentar el consumo de alimento y favorece la eficiencia en la conversión del alimento en peso corporal. Esto no solo beneficia la rentabilidad de la producción porcina, sino que también reduce el impacto ambiental al disminuir la excreción de fósforo en el estiércol.

8. LÍMITE DE ESPACIO

El trabajo se realizó en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada en El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, C. P 50295. Sus coordenadas son; Longitud (dec): -99.69037600, Latitud (dec): 19.40830200. La localidad se encuentra a una altura de 2632 metros sobre el nivel del mar, su clima es templado subhúmedo con temperatura media anual de 13.7°C, la precipitación media anual varía de 1,000 a 1,200 mm; las heladas son de 80 a 140 días en la época fría (INAFED-SEGOB, 2010).

9. LÍMITE DE TIEMPO

El trabajo de investigación se realizará en las siguientes fases

- 1.-Redacción del Protocolo, marzo 2025
2. Redacción de la Tesina; Marzo, abril 2025
- 3.-Entrega del documento, Abril 2025

10. LITERATURA CITADA

- Abdollahi, M. R., Duangnumsaeng, Y., Kwakkel, R. P., Steinfeldt, S., Bootwalla, S. M., & Ravindran, V. (2016). Investigation of the interaction between separate calcium feeding and phytase supplementation on growth performance, calcium intake, nutrient digestibility and energy utilisation in broiler starters. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 48-58.
- Adeola O, Cowieson A.J. (2011). Board-invited review: Opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve on ruminant animal production. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89:3189-3218.
- AOAC. (2000). Phytase activity in feed: Colorimetric enzymatic method. In Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed. Assoc. Off. Anal. Chem., Arlington, VA. 84, 629
- Appuhamy JADRN, Strathe AB, Jayasundara S, Dijkstra J, France J, Kebreab E. (2013). Anti-methanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: a metaanalysis. *Journal of Dairy Science*. 96:5161-73. doi: 10.3168/jds.2012-5923
- Aranda, E. Gonzalez, M. Osorio, J. Robles, L. (2022) *modo de acción y eficiencia productiva de las enzimas exógenas en cerdos cuando se suplementan en las etapas de destete, crecimiento y finalización*. (Tesis licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de México. 9,
- Arohuanca Calisaya, C. A. (2016). *Evaluación de la carga de nitrógeno y fósforo en las principales fuentes puntuales que vierten al lago Titicaca como fuente de Eutrofización* Puno 2015. (Tesis licenciatura) Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- Benítez-Meza, A., Gómez-Gurrola, A., Hernández-Ballesteros, J., Navarrete-Méndez, R., & Moreno-Flores, L. (2015). evaluation of the productive and economic performance of feed for fattening pigs evaluación de parámetros productivos y económicos en la alimentación de porcinos en engorda. *Abanico veterinario*, 5(3), 36-41.
- Bhagat, D., Raina, N., Kumar, A., Katoch, M., Khajuria, Y., Slathia, P. S., & Sharma, P. (2020). Probiotic properties of a phytase producing *Pediococcus acidilactici* strain SMVDUDB2 isolated from traditional fermented cheese product, Kalarei. *Scientific Reports*, 10(1), 1926.
- Cadogan, D. J., Wilkinson, S., Velayudhan, D., Dersjant-Li, Y., & Cottrell, J. J. (2023). 47. Modern phytases increase ileal gross energy digestibility in grower pigs. *Animal-science proceedings*, 14(7), 864-865.
- Carmeliet, G., Dermauw, V., & Bouillon, R. (2015). Vitamin D signaling in calcium and bone homeostasis: a delicate balance. Best practice & research *Clinical endocrinology & metabolism*, 29(4), 621-631.
- Correa, T. L. R., de Queiroz, M. V., & de Araújo, E. F. (2015). Cloning, recombinant expression and characterization of a new phytase from *Penicillium chrysogenum*. *Microbiological Research*, 170, 205-212.

- Cortés Tinoco, G. F., Mora Flores, J. S., García Mata, R., & Ramírez Valverde, G. (2012). Estudio del consumo de la carne de cerdo en la zona metropolitana del Valle de México. *Estudios sociales* (Hermosillo, Son.), 20(40), 315-351
- Crenshaw, T. D., & Rortvedt-Amundson, L. A. (2014). *Nutritionally induced cellular signals that affect skeletal integrity in swine*. In Proceedings of the 23rd International Pig Veterinary Congress (IPVS), Cancun, Mexico (Vol. 1, pp. 75-83).
- Cuarón Ibargüengoytia J.A. (2015). Fósforo para cerdos: ¿qué sabemos y qué falta todavía? <https://www.elsitioporcino.com/articles/2585/fasforo-para-cerdos-nqua-sabemos-y-qua-falta-todavaa/> acceso. 18 marzo, 2025
- Da Silva CA, Callegari MA, Dias CP, Bridi AM, Pierozan CR, Foppa L, Da Silva Martins CC, Falleiros DFT, Passos A, Hermes R. (2019): Increasing doses of phytase from *Citrobacter braakii* in diets with reduced inorganic phosphorus and calcium improve growth performance and lean meat of growing and finishing pigs. *Plos one*. 14(5): e0217490.
- de Faria, H. G., Thomaz, M. C., dos Santos Ruiz, U., Robles-Huaynate, R. A., Watanabe, P. H., De Melo, G. M. P., & Da Silva, S. Z. (2015). *Effects of phytase on pig diets digestibilities, bone mineral deposition, performance and manure production*. Semina: Ciências Agrárias, 36(2), 4519-4529.
- del Rosario Villavicencio-Gutiérrez, M., Martínez-Castañeda, F. E., Rogers-Montoya, N. A., Martínez-Campos, A. R., Gómez-Tenorio, G., Velazquez, L., & Peñuelas-Rivas, C. G. (2024). Environmental impacts of medium-scale pig farming at technical and economic optimum production weight in Mexico. *Science of The Total Environment*, 946, 174240.
- DerSimonian R, Laird N. (2015). Meta-analysis in clinical trials revisited. *Contemporary Clinical Trials Communications*. 45:139-45.
- Dersjant-Li Y, Awati A, Schulze H, Partridge G. (2014). Phytase in non-ruminant animal nutrition: a critical review on phytase activities in the gastrointestinal tract and influencing factors. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 95: 878-896.
- Dersjant-Li Y, Schuh K, Weallean AL, Awati A, Dusel G. (2017). Effect of a Buttiauxella phytase on production performance in growing/finishing pigs fed a European-type diet without inclusion of inorganic phosphorus. *Journal of Applied Animal Nutrition*. 5: 1-7.
- DiGiacomo, K., & Leury, B. J. (2019). Insect meal: a future source of protein feed for pigs?. *Animal*, 13(12), 3022-3030.
- Dos Santos, J. C. R., Norenberg, A., Correia, B., Irgang, R., Bianchi, I., Moreira, F., ... & Peripolli, V. (2023). Evaluation of different percentages of Duroc genes and gender on growth, carcass and meat quality traits for pigs. *Meat Science*, 205, 109314.
- EFSA. (2012). Scientific opinion on the safety and efficacy of RONOZYME®HiPhos M/L (6-phytase) as a feed additive for poultry and pigs. EFSA panel on genetically modified organisms (GMO). *EFSA Journal*.10: 2527.

- Erpel, F., Restovic, F., & Arce-Johnson, P. (2016). Development of phytase-expressing *Chlamydomonas reinhardtii* for monogastric animal nutrition. *BMC biotechnology*, 16, 1-7.
- Estévez-Moreno, L. X., & Miranda-de la Lama, G. C. (2022). Meat consumption and consumer attitudes in México: Can persistence lead to change?. *Meat Science*, 193, 108943.
- Evin, A., Dobney, K., & Cucchi, T. (2017). A history of pig domestication: new ways of exploring a complex process. In *Ecology, conservation and management of wild pigs and peccaries* (pp. 39-48). Cambridge University Press.
- Ewing, W. N. (1997). The feeds directory: commodity products guide (Ewing, W. N.) p. 118.
- FIRA (2024). Panorama Agroalimentario 2024 carne de cerdo. <https://www.fira.gob.mx>
- Fredlund, K., Isaksson, M., Rossander-Hulthén, L., Almgren, A., & Sandberg, A. S. (2006). Absorption of zinc and retention of calcium: dose-dependent inhibition by phytate. *Journal of Trace elements in Medicine and Biology*, 20(1), 49-57.
- Frenseuie, D., Chicco, C. F., Godoy, S., & Garmendia, J. (2004). Fuentes de fósforo en la alimentación de cerdos. 2. Digestibilidad. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias*, 14(3), 201-207.
- Gaind, S., & Singh, S. (2015). Production, purification and characterization of neutral phytase from thermotolerant *Aspergillus flavus* ITCC 6720. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 99, 15-22.
- Gessler, N. N., Serdyuk, E. G., Isakova, E. P., & Deryabina, Y. I. (2018). Phytases and the prospects for their application. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 54, 352-360.
- Giraldi-Díaz, M. R., Castillo-González, E., De Medina-Salas, L., Velasquez-De la Cruz, R., & Huerta-Silva, H. D. (2021). Environmental impacts associated with intensive production in pig farms in Mexico through life cycle assessment. *Sustainability*, 13(20), 11248.
- Greiner, R., Larsson Alminger, M., Carlsson, N. G., Muzquiz, M., Burbano, C., Cuadrado, C., ... & Goyoaga, C. (2002). Pathway of dephosphorylation of myo-inositol hexakisphosphate by phytases of legume seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(23), 6865-6870.
- Han, Y. M., Yang, F., Zhou, A. G., Miller, E. R., Ku, P. K., Hogberg, M. G., & Lei, X. G. (1997). Supplemental phytases of microbial and cereal sources improve dietary phytate phosphorus utilization by pigs from weaning through finishing. *Journal of Animal Science*, 75(4), 1017-1025.
- Hedges LV. (1981) Teoría de la distribución para el estimador del tamaño del efecto de Glass y estimadores relacionados. *J Educ Stat.* 107-28.
- Hernández, K. P. G., Rebolledo, O. F. P., & Casillas, A. C. G. (2023). Producción y comercio de la carne en el mundo y en México. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 23(46), 135-156.

- Higgins JPT, Green S. (2011). Manual Cochrane de Revisiones Sistemáticas de Intervenciones Versión 5.1.0. Londres: Colaboración Cochrane Disponible en línea en: www.handbook.cochrane.org.quantified (consultado el 3 de febrero de 2025).
- Jongbloed AW, Van Diepen JThM, Kemme PA, Broz J. (2004): Efficacy of microbial phytase on mineral digestibility in diets for gestating and lactating sows. *Livestock Production Science*, 91(1-2): 143-155.
- Joshi S, Satyanarayana T. (2015) Bioprocess for efficient production of recombinant *Pichia anomala* phytase and its applicability in dephytinizing chick feed and whole wheat flat Indian breads. *J Ind Microbiol Biotechnol.*;42(10):1389–1400.
- Joudaki, H., Aria, N., Moravej, R., Rezaei Yazdi, M., Emami-Karvani, Z., & Hamblin, M. R. (2023). Microbial phytases: properties and applications in the food industry. *Current microbiology*, 80(12), 374.
- Kazemzadeh, S., Naghavi, N. S., Emami-Karvani, Z., Emtiazi, G., & Fouladgar, M. (2020). Production of glycolipid biosurfactant during crude oil degradation by the novel indigenous isolated *Achromobacter kerstersii* LMG3441. *Water Science and Technology*, 82(10), 2134-2147.
- Kim JC, Sands JS, Mullan BP, Pluske JR. (2008). Performance and total-tract digestibility responses to exogenous xylanase and phytase in diets for growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 142:163-172.
- Klosowski, G., Mikulski, D., & Jankowiak, O. (2018). Extracellular phytase production by the wine yeast *S. cerevisiae* (Finarome Strain) during submerged fermentation. *Molecules*, 23(4), 848.
- Knochel JP,. Phosphorus. In: Shils ME, Shike M, Ross AC, Caballero B, Cousins RJ, eds. (2006) Phosphorus. In: Modern Nutrition in Health and Disease. 10th ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins; 2006:211-222
- Kuhlers, D. L., Jungst, S. B., & Little, J. A. (1989). Comparisons of specific crosses from Duroc-Landrace, Yorkshire-Landrace and Hampshire-Landrace sows managed in two types of gestation systems: pig performance. *Journal of Animal Science*, 67(10), 2595-2602.
- Kumar, A., Chanderman, A., Makolomakwa, M., Perumal, K., & Singh, S. (2016). Microbial production of phytases for combating environmental phosphate pollution and other diverse applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(6), 556-591.
- Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P., De Boeck, G., & Becker, K. (2012). Phytate and phytase in fish nutrition. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 96(3), 335-364.
- Laughinghouse, H. D., Smyth, A., Havens, K., & Frazer, T. (2022). Repensando el papel del nitrógeno y fósforo en la eutrofización de los ecosistemas acuáticos: SGEF190s/SG191, 4/2022. *EDIS*, 2022(2).

- Lautrou, M., Narcy, A., Dourmad, J. Y., Pomar, C., Schmidely, P., & Létourneau Montminy, M. P. (2021). Dietary phosphorus and calcium utilization in growing pigs: requirements and improvements. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 734365.
- Lei XG, Weaver JD, Mullaney E, Ullah AH, Azain MJ. (2013). Phytase, a New Life for an “Old” Enzyme. *Annual Review of Animal Biosciences*. 1:283-309.
- Liu, X., Han, R., Cao, Y., Turner, B. L., & Ma, L. Q. (2022). Enhancing phytate availability in soils and phytate-P acquisition by plants: a review. *Environmental Science & Technology*, 56(13), 9196-9219.
- López, N., & Galíndez, R. (2011). Evaluación de la productividad acumulada al destete en cerdas Large White, Landrace y Cruzadas en una granja comercial. *Zootecnia Tropical*, 29(4), 445-453.
- Magaña, M. A. M., Morales, C. L., Solís, J. F. D. J. A., & Urquizo, E. A. (2023). Índices de competitividad de la producción mexicana de carne de cerdo en el mercado internacional. *Atlantic Review of Economics: Revista Atlántica de Economía*, 6(2), 3.
- Mo, A. Y., Park, S. M., Kim, Y. S., Yang, M. S., & Kim, D. H. (2005). Expression of fungal phytase on the cell surface of *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 10, 576-581.
- National Research Council. (2012). Nutrient Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13298>.
- Nielsen, A. V., Tetens, I., & Meyer, A. S. (2013). Potential of phytase-mediated iron release from cereal-based foods: a quantitative view. *Nutrients*, 5(8), 3074-3098.
- Nortey TN, Patience JF, Simmins PH, Trottier NL, Zijlstra RT. (2007): Effects of individual or combined xylanase and phytase supplementation on energy, amino acid, and phosphorus digestibility and growth performance of grower swine fed wheat-based diets containing wheat millrun. *Journal of Animal Science*, 85(6): 1432-1443.
- Olukosi OA, Sands JS, Adeola O. (2007). Supplementation of carbohydrases or phytase individually or in combination to diets for weanling and growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science*. 85:1702-1711.
- Omogbenigun FO, Nyachoti CM, Slominski BA. (2004). Dietary supplementation with multienzyme preparations improves nutrient utilization and growth performance in weaned pigs. *Journal of Animal Science*. 82:1053-1061.
- Pastoureau, M. (2015). El cerdo. Historia de un primo malquerido. Salamanca: Confluencias.
- Patience, J. F., Rossoni-Serão, M. C., & Gutiérrez, N. A. (2015). A review of feed efficiency in swine: biology and application. *Journal of animal science and biotechnology*, 6, 1-9.
- Philippi, H., Sommerfeld, V., Windisch, W., Olukosi, O. A., Monteiro, A., & Rodehutschord, M. (2023). Interactions of zinc with phytate and phytase in the digestive tract of poultry and pigs: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7333-7342.

- Pomar, C., Andretta, I., & Remus, A. (2021). Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 742220.
- Porres, J. M., Aranda, P., López-Jurado, M., & Urbano, G. (2003). Effect of natural and controlled fermentation on chemical composition and nutrient dialyzability from beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 5144-5149.
- Potot, S., Serra, C. R., Henriques, A. O., & Schyns, G. (2010). Display of recombinant proteins on *Bacillus subtilis* spores, using a coat-associated enzyme as the carrier. *Applied and environmental microbiology*, 76(17), 5926-5933.
- Pragya, Sharma, K. K., Kumar, A., Singh, D., Kumar, V., & Singh, B. (2023). Immobilized phytases: an overview of different strategies, support material, and their applications in improving food and feed nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(22), 5465-5487.
- R Core Team. 2016. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.Rproject.org>. (consultado 18 de marzo 2025)
- Ravindran V. (2013): Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities. *Journal of Applied Poultry Research*, 22(3): 628-636.
- Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2016). Microbial enzyme production using lignocellulosic food industry wastes as feedstock: a review. *Bioengineering*, 3(4), 30.
- Rebollar, P. G., & Mateos, G. G. (1999). El fósforo en nutrición animal. Necesidades, valoración de materias primas y mejora de la disponibilidad. XV Curso de Especialización. Avances en nutrición y alimentación animal. *Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal FEDNA*. Madrid, 31
- Reyes Gabriel, A., & López Barbosa, L. A. (2019). Una experiencia de integración productiva en la cadena de valor de porcinos, en el Municipio de Ayotlán, Estado de Jalisco: un estudio de caso.
- Reyes, A. E. I., Muñiz, A. R. O., Mosqueda, M. D. L. J., González, J. A. G., & Izquierdo, A. C. (2017). Comportamiento de la porcicultura mexicana de los años 1970 a 2017. Una revisión documental sobre su desempeño. *Sociedades rurales, producción y medio ambiente*, (34), 153-168.
- Rodríguez-Fernández, D. E., Parada, J. L., Medeiros, A. B., de Carvalho, J. C., Lacerda, L. G., Rodríguez-León, J. A., & Soccol, C. R. (2013). Concentration by ultrafiltration and stabilization of phytase produced by solid-state fermentation. *Process Biochemistry*, 48(2), 374-379.
- Sampath, V., Sureshkumar, S., Seok, W. J., & Kim, I. H. (2023). Role and functions of micro and macro-minerals in swine nutrition: a short review. *Journal of Animal Science and Technology*, 65(3), 479.
- Samtiya, M., Aluko, R. E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 1-14.

- Santiago-Peña, L. F. (2020). Fisiología de las glándulas paratiroides. Disfunción y parámetros funcionales de laboratorio en paratiroides. *Revista ORL*, 11(3), 341-345.
- SAS Institute Inc. (2004). SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schwarzer, G. (2017). Meta: General Package for Meta-Analysis (<https://cran.r-project.org/web/packages/meta/index.html>).
- Schwarzer, G., Carpenter, J. R., Rücker, G., Schwarzer, G., Carpenter, J. R., & Rücker, G. (2015). Meta-analysis with binary outcomes. Springer international publishing. (pp. 55-83).
- Secco, D., Bouain, N., Rouached, A., Prom-u-Thai, C., Hanin, M., Pandey, A. K., & Rouached, H. (2017). Phosphate, phytate and phytases in plants: from fundamental knowledge gained in Arabidopsis to potential biotechnological applications in wheat. *Critical reviews in biotechnology*, 37(7), 898-910.
- Sefer D, Petrujkic B, Markovic R, Grdovic S, Nestorovic B, Bogosavljevic V, Milic D. (2012): Effect of phytase supplementation on growing pigs performance. *Acta Veterinaria Beograd*, 62(5-6): 627-639.
- Selle, P. H., & Ravindran, V. (2008). Phytate-degrading enzymes in pig nutrition. *Livestock Science*, 113(2-3), 99-122.
- Singh, B., & Satyanarayana, T. (2015). Fungal phytases: characteristics and amelioration of nutritional quality and growth of non-ruminants. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 99(4), 646-660.
- Soler, F. D. (2022). *Efecto del uso de fitasa en la dieta de cerdos en etapa de engorde* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2022).
- Stein, H. H. (2011). Digestibilidad fecal estandarizada del fósforo en cerdos. *FEDNA*, 27, 229-234.
- Tsai TC, Dove R, Bedford MR, Azain MJ. (2019): Effect of phytase on phosphorous balance in 20-kg barrows fed low or adequate phosphorous diets. *Animal Nutrition Journal*, 6(1): 9-15.
- Ushasree, M. V., Shyam, K., Vidya, J., & Pandey, A. (2017). Microbial phytase: impact of advances in genetic engineering in revolutionizing its properties and applications. *Bioresource technology*, 245, 1790-1799.
- Vijayaraghavan, P., Primiya, R. R., & Prakash Vincent, S. G. (2013). Thermostable alkaline phytase from *Alcaligenes* sp. in improving bioavailability of phosphorus in animal feed: in vitro analysis. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 394305.
- Villagómez-Estrada, S., Pérez, J. F., van Kuijk, S., Melo-Durán, D., Karimirad, R., & Solà-Oriol, D. (2020). Dietary preference of newly weaned pigs and nutrient interactions according to copper levels and sources with different solubility characteristics. *Animals*, 10(7), 1133.
- Wang, L., & Li, D. (2024). Current status, challenges and prospects for pig production in Asia. *Animal Bioscience*, 37(4), 742.

- Woyengo TA, Dupe VIGE, Akinremi OO, Nyachoti CM. (2016). Performance and nutrient digestibility in growing pigs fed wheat dried distillers' grain with solubles-containing diets supplemented with phytase and multi-carbohydrase. *Animal Science Journal*. 87:570-577.
- Xiong, A. S., Yao, Q. H., Peng, R. H., Zhang, Z., Xu, F., Liu, J. G., ... & Chen, J. M. (2006). High level expression of a synthetic gene encoding *Peniophora lycii* phytase in methylotrophic yeast *Pichia pastoris*. *Applied microbiology and biotechnology*, 72, 1039-1047.
- Yáñez JL, Landero JL, Owusu-Asiedu A, Cervantes M, Zijlstra RT. (2013). Growth performance, diet nutrient digestibility, and bone mineralization in weaned pigs fed pelleted diets containing thermostable phytas. *Journal of Animal Science*. 91:745-754.
- Zeng ZK, Piao XS, Wang D, Li PF, Xue LF, Lorraine Salmon¹, Zhang HY, Han X, Liu L. (2011). Effect of Microbial Phytase on Performance, Nutrient Absorption and Excretion in Weaned Pigs and Apparent Ileal Nutrient Digestibility in Growing Pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*. 1164-1172.
- Zeng ZK, Wang D, Piao XS, Li PF, Zhang HY, Shi CX, Yu SK. (2014). Effects of Adding Super Dose Phytase to the Phosphorus-deficient Diets of Young Pigs on Growth Performance, Bone Quality, Minerals and Amino Acids Digestibilities. *Asian Australasian Journal of Animal Science*. 27:237-246.
- Zeng, Z., Li, Q., Tian, Q., Zhao, P., Xu, X., Yu, S., & Piao, X. (2015). Super high dosing with a novel *Buttiauxella* phytase continuously improves growth performance, nutrient digestibility, and mineral status of weaned pigs. *Biological Trace Element Research*, 168, 103-109.
- Zhai, H., McCormack, U. M., Zhang, J., Wang, Z., Wang, S., & Stamatopoulos, K. (2023). 48. Increasing the dietary supplementation of a new generation phytase can counteract the detrimental effect of calcium on phosphorus absorption in pigs. *Animal-science proceedings*, 14(7), 865-8.