



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

T E S I S :

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA
DIETA DE LECHONES (6-30 KG) SOBRE CITOCINAS PROINFLAMATORIAS,
INTEGRIDAD INTESTINAL, METABOLITOS ENERGÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD**

Que presenta:

M.V.Z. CYNTHIA MICHELLE GONZÁLEZ BORJA

Para obtener el título de
Maestra en Ciencias Biológicas

Director de Tesis:

Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez

Codirector de Tesis:

Dr. Ruy Ortiz Rodríguez

Morelia, Michoacán, febrero de 2025.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

TESIS:

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUDADO A LA
DIETA DE LECHONES (6-30 KG) SOBRE CITOCINAS PROINFLAMATORIAS,
INTEGRIDAD INTESTINAL, METABOLITOS ENERGÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD**

Que presenta:

M.V.Z. CYNTIA MICHELLE GONZÁLEZ BORJA

Para obtener el título de
Maestra en Ciencias Biológicas

Director de Tesis:

Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez

Codirector de Tesis:

Dr. Ruy Ortiz Rodríguez

Comité Tutorial:

Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores

Dr. Daniel Val Arreola

Dr. Gerardo Ordaz Ochoa

Morelia, Michoacán, febrero de 2025.

Agradecimientos

A mi novio, Giovany, por cuidarme y ayudarme en cada uno de los momentos de este trabajo. Por siempre estar a pesar de todo. Por ser el apoyo más grande y siempre ayudar a levantarme cada vez que sentía que no podría.

A mis papás, Cyntia y Alejandro, por estar cuando los necesitaba y por apoyarme en todas mis decisiones.

Al Dr. Ruy Ortiz, por su disposición, apoyo, enseñanza y paciencia para encaminarme en esta nueva etapa.

Al Dr. Manuel López, a la Dra. Yurixi Sarai y a la Dra. Bety Salas, por su apoyo académico y sobre todo apoyo emocional en todos los momentos difíciles de esta etapa.

A Yuri y Luis, porque juntos hicimos posible la realización del experimento.

A mis amigos y compañeros que ayudaron a la realización de este proyecto: Aarón, Emmanuel C., Adrián, Don Carlos, Manuel, Casimiro, Belén, Daniel, Alan, Rafa y Emmanuel G.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo económico durante toda esta etapa.

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y a la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH, por brindarme el espacio y el material para la realización de este trabajo.

Dedicatoria

A mi abuelo Marco, porque en sus últimos días estuvo al pendiente para estar seguro de que pudiera entrar a esta maestría.

A Jasper, porque llegó cuando empecé el camino en la investigación y se fue a punto de concluir este proyecto.

Índice

	Pág.
Resumen	1
Abstract	2
Introducción General	3
Hipótesis	5
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
Metodología general	7
CAPÍTULO I. Efecto del proceso de extrusado de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) sobre propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios	12
Resumen.....	12
Introducción.....	13
Material y Métodos.....	14
Resultados.....	17
Discusión.....	18
Conclusión.....	21
Bibliografía.....	21
CAPÍTULO II. Efecto de la adición de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) extrusado a la dieta de lechones postdestete (primera semana) sobre citocinas proinflamatorias y su relación con variables productivas	26
Resumen.....	26
Introducción.....	27
Material y Métodos.....	28
Resultados.....	32
Discusión.....	35
Conclusión.....	38
Bibliografía.....	39
CAPÍTULO III. Efecto de la adición de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) extrusado a la dieta de lechones destetados sobre integridad de las vellosidades intestinales y su relación con variables productivas	42
Resumen.....	42
Introducción.....	43
Material y Métodos.....	44
Resultados.....	48
Discusión.....	52
Conclusión.....	55
Bibliografía.....	55
CAPÍTULO IV. Efecto de la adición de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre glucosa, colesterol total y triglicéridos sanguíneos y su relación con la productividad	60
Resumen.....	60
Introducción.....	60
Material y Métodos.....	62
Resultados.....	65
Discusión.....	68
Conclusión.....	70
Bibliografía.....	71

CAPÍTULO V. Efecto de la adición de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) extrusado a la dieta de lechones (6 a 30 kg) sobre consumo de alimento y variables productivas.....	75
Resumen.....	75
Introducción.....	76
Material y Métodos.....	77
Resultados.....	81
Discusión.....	84
Conclusión.....	87
Bibliografía.....	87
Discusión General.....	92
Conclusión General.....	99
Bibliografía General.....	100
Anexos.....	105

Índice de tablas y figuras

	Pág.
CAPÍTULO I	
Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis fisicoquímico del nopal de acuerdo con el tratamiento.....	17
Figura 1. Medias de mínimos cuadrados para metabolitos secundarios del nopal (<i>O. ficus indica</i>) de acuerdo con el tratamiento.....	18
CAPÍTULO II	
Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados...	29
Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo.....	34
Tabla 3. Correlaciones de Pearson entre citocinas proinflamatorias y consumo de alimento comercial en lechones destetados y en la primera semana de fase de iniciación...	35
Tabla 4. Estimadores de la regresión lineal para el consumo de alimento de lechones del grupo testigo (GT) en la primera semana de la fase de iniciación de acuerdo con el tipo de citocina proinflamatoria.....	35
Figura 1. Comportamiento de las concentraciones séricas de las citocina IL-1 β (A), IL-12 (B) y TNF- α (C) de acuerdo con el día del destete y grupo y predicción del comportamiento del consumo de alimento/lechón en el GT de acuerdo con la concentración de IL-1 β (D), IL-12 (E) y TNF- α (F).....	33
CAPÍTULO III	
Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados...	45
Tabla 2. Medias de mínimos cuadrados para largo y ancho de vellosidades y profundidad de criptas de acuerdo con la porción intestinal y el grupo.....	49
Tabla 3. Medias de mínimos cuadrados para variables productivas de los lechones en la etapa 1 a 14 días postdestete de acuerdo con el grupo.....	51
Figura 1. Media de mínimos cuadrados para área de absorción respecto al grupo y porción intestinal.....	50
CAPÍTULO IV	
Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados...	62
Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo.....	67
Figura 1. Medias de mínimos cuadrados para niveles de glucosa sanguínea de acuerdo con la semana experimental.....	65
Figura 2. Medias de mínimos cuadrados para niveles de colesterol sanguíneos de acuerdo con la semana experimental.....	66
Figura 3. Medias de mínimos cuadrados para niveles de triglicéridos sanguíneos de acuerdo con la semana experimental.....	67
CAPÍTULO V	
Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados...	78
Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo.....	82
Tabla 3. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el SubGrupo.....	84
Figura 1. Dinámica de crecimiento (kg) de lechones en fase de iniciación de acuerdo con la semana de la fase y al SubGrupo.....	83

Resumen

El objetivo fue determinar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre citocinas proinflamatorias, integridad de vellosidades intestinales, metabolitos energéticos y variables productivas. Se utilizaron 30 lechones destetados (21 ± 2 días de edad) seleccionados al azar. La investigación se dividió en dos etapas (E): E1 o adaptación (14 días) a la fase de iniciación (FI) y E2 o post-adaptación a la FI (duración 28 días). En E1, se conformaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹): Grupo testigo (GT), Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE); estos grupos recibieron alimento® específico para la FI. Al alimento del GNBF se le adicionó 1.0% de nopal en base fresca (BF). Al alimento del GNE se le adicionó 0.1% de extrusado de nopal. El porcentaje de nopal (BF y extrusado) fue con base al peso lechón⁻¹. En la E2, se subdividió a los tres grupos de la E1 ($n=5$ lechones subgrupo⁻¹) en subgrupos: subgrupo GTa, continuó como testigo, subgrupo GNBFa, continuó con adición de nopal BF; subgrupo GRNBF, se restringió la adición de nopal BF; subgrupo GNEa continuó con adición de extrusado y subgrupo GRNE, se restringió el extrusado. Se obtuvieron muestras de sangre los días 0, 3, 7, 14, 28 y 42 postdestete. Al culminar la E1, se seleccionaron tres lechones al azar (lechón grupo⁻¹), de los cuales se tomaron muestras (10 cm) de cada porción del intestino delgado para su análisis histológico. Se evaluó concentración de citocinas proinflamatorias (IL-1 β , IL-12 y TNF- α), largo y ancho de las vellosidades intestinales (VI), profundidad de criptas (PCrip), relación Vellosidad:cripta (R-VI:Crip) y área de absorción (Abs). En lo referente a metabolitos energéticos se evaluó: glucosa (GLU), colesterol total (COL), triglicéridos (TG) y en productividad se evaluó: consumo de alimento (CA), peso (P), ganancia de peso (GP), índice de conversión alimenticia (ICA). La información se analizó a través de mediciones repetidas y a través de modelo de efectos fijos. Las diferencias entre grupos y/o subgrupos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha=0.05$. Se encontró que el GNBF mostró la menor ($p<0.05$) concentración de IL-1 β , IL-12 y TNF- α al tercer y séptimo día: 113.56 ± 5.46 , 120.49 ± 2.68 y 89.66 ± 2.98 pg/mL para IL-1 β , IL-12 y TNF- α , respectivamente. En duodeno, el largo ($627.3 \mu\text{m}$), ancho ($233.9 \mu\text{m}$) de VI y PCrip ($784.2 \mu\text{m}$) fueron mayores ($p<0.05$) en GNBF vs GNE y GT; en yeyuno, solo el ancho ($136.4 \mu\text{m}$) de las VI y PCrip ($543.5 \mu\text{m}$) fueron mayores ($p<0.05$) en GNBF; en el íleon, el largo (476.2), ancho (153.9) de las VI, PCrip (338.9) y R-VI:Crip (1.4) también fueron mayores en GNBF vs GNE y GT. En el GNBF se observaron los menores ($p<0.05$) promedios de GLU durante las dos Etapas evaluadas; los cuales oscilaron entre $59-73 \text{ mg dL}^{-1}$. Las concentraciones de COL (entre 66 y 88 mg dL^{-1}) y TG (10 a 20 mg dL^{-1}) fueron similares ($p>0.05$) en todos los grupos evaluados. Al culminar la E1, el peso ($12.955 \text{ kg lechón}^{-1}$), la GDP ($426 \text{ g lechón}^{-1}$) y el CTA ($3.377 \text{ kg lechón}^{-1}$) mostraron un mejor ($p<0.05$) comportamiento en el GNE vs GNBF y GT; pero, el ICA fue similar ($p>0.05$) en los tres grupos. En la E2, el peso final ($\geq 29.525 \text{ kg}$) y GP diario ($\geq 658 \text{ g día}^{-1}$) fue similar ($p>0.05$) en los cinco subgrupos; pero, el ICA mostró mejor comportamiento en los subgrupos GNBFa (1.7) y GRNBF (1.6). La adición de 0.1% de extrusado de nopal (*O. ficus-indica*) a la dieta de lechones (6-30 kg) aumenta el consumo voluntario de alimento al disminuir la concentración de citocinas proinflamatorias, sin embargo, no tiene efecto sobre la integridad intestinal (VI y Abs) ni sobre los metabolitos energéticos (GLU, COL, TG). En este sentido, es necesario evaluar diferentes niveles de inclusión de nopal extrusado a la dieta de lechones en la fase de iniciación para poder establecer con mayor precisión si la dieta adicionada con nopal extrusado tiene efecto sobre el sistema gastrointestinal y las variables productivas.

Palabras clave: cactácea, procesamiento de alimento, destete, prebiótico, antioxidante.

Abstract

The objective was to determine the effect of the addition of extruded nopal (*Opuntia ficus-indica*) to the diet of piglets in the initiation phase (6-30 kg) on proinflammatory cytokines, intestinal villus integrity, energy metabolites and productive variables. Thirty randomly selected weaned piglets (21 ± 2 days of age) were used. The investigation was divided into two stages (S): S1 or adaptation (14 days) to the initiation phase (IF) and S2 or post-adaptation to IF (duration 28 days). In S1, three groups were formed ($n=10$ piglets' group⁻¹): control group (GT), fresh-based nopal group (GNBF) and extruded nopal group (GNE); these groups received specific feed® for the IF. The GNBF feed was supplemented with 1.0% fresh-based nopal (BF). The GNBF feed was supplemented with 0.1% nopal extrudate. The percentage of nopal (BF and extruded) was based on piglet weight⁻¹. At S2, the three groups from S1 ($n=5$ piglets' subgroup⁻¹) were subdivided into subgroups: subgroup GTa, continued as control; subgroup GNBFa, continued with addition of BF nopal; subgroup GRNBF, restricted the addition of BF nopal; subgroup GNEa, continued with addition of extruded nopal; and subgroup GRNE, restricted the addition of extruded nopal. Blood samples were obtained on days 0, 3, 7, 14, 28 and 42 post-weaning. At the end of S1, three piglets were randomly selected (piglet group⁻¹), from which samples (10 cm) were taken from each portion of the small intestine for histological analysis. The concentration of proinflammatory cytokines (IL-1 β , IL-12 and TNF- α), length and width of intestinal villi (VI), crypt depth (DCryp), villus:crypt ratio (R-VI:Cryp) and absorption area (Abs) were evaluated. In terms of energy metabolites, the following were evaluated: glucose (GLU), total cholesterol (CHOL), triglycerides (TG) and in terms of productivity: feed intake (FI), weight (W), weight gain (WG), feed conversion index (FCI). The information was analyzed through repeated measurements and through a fixed effects model. Differences between groups and/or subgroups were obtained through the least squares means at $\alpha=0.05$. GNBF was found to show the lowest ($p<0.05$) concentration of IL-1 β , IL-12 and TNF- α on the third and seventh day: 113.56 ± 5.46 , 120.49 ± 2.68 and 89.66 ± 2.98 pg/mL for IL-1 β , IL-12 and TNF- α , respectively. In duodenum, the length ($627.3 \mu\text{m}$), width ($233.9 \mu\text{m}$) of VI and DCryp ($784.2 \mu\text{m}$) were greater ($p<0.05$) in GNBF vs GNE and GT; in jejunum, only the width ($136.4 \mu\text{m}$) of VI and DCryp ($543.5 \mu\text{m}$) were greater ($p<0.05$) in GNBF; in ileum, the length (476.2), width (153.9) of the VI, DCryp (338.9) and R-VI:Cryp (1.4) were also greater in GNBF vs GNE and GT. In GNBF the lowest ($p<0.05$) GLU averages were observed during the two stages evaluated, which ranged from 59 - 73 mg dL⁻¹. The concentrations of CHOL (between 66 and 88 mg dL⁻¹) and TG (10 to 20 mg dL⁻¹) were similar ($p>0.05$) in all groups evaluated. At the end of S1, weight (12.955 kg piglet⁻¹), DWG (426 g piglet⁻¹) and total FI (3.377 kg piglet⁻¹) showed a better ($p<0.05$) performance in the GNE vs GNBF and GT; but the FCI was similar ($p>0.05$) in the three groups. In S2, final weight (≥ 29.525 kg) and daily WG (≥ 658 g day⁻¹) were similar ($p>0.05$) in the five subgroups; but FCI showed better performance in the GNBFa (1.7) and GRNBF (1.6) subgroups. The addition of 0.1% extruded nopal (*O. ficus-indica*) to the diet of piglets (6-30 kg) increases voluntary feed intake by decreasing the concentration of proinflammatory cytokines, however, it has no effect on intestinal integrity (VI and Abs) or on energy metabolites (GLU, CHOL, TG). In this sense, it is necessary to evaluate distinct levels of inclusion of extruded nopal in the diet of piglets in the initiation phase in order to establish with greater precision if the diet added with extruded nopal influences the gastrointestinal system and productive variables.

Key words: cactus, food processing, weaning, prebiotic, antioxidant.

Introducción General

En la actualidad la porcicultura es de las actividades pecuarias más importantes a nivel mundial; puesto que, la carne de cerdo es la más consumida en el mundo. Para el 2022, los mayores productores de cerdo fueron China, la Unión Europea y E.U.A; mientras que los países con mayor consumo fueron: Unión Europea, Corea del Sur y China (COMECARNE, 2023). Respecto a la porcicultura mexicana, en el 2022 se alcanzó una producción de 551,049 toneladas, siendo Jalisco, Sonora y Puebla los estados que presentaron la mayor producción a nivel nacional, al contribuir con 51.4% de la producción total (SIAP, 2022). Sin embargo, la producción total de carne de cerdo en el país no satisface la demanda de la población mexicana (Benítez-Meza *et al.*, 2015); por lo que, las importaciones de este producto llegaron a las 498 mil toneladas (4.4 veces más que en el 2021) (SIAP, 2022).

La incapacidad para satisfacer la demanda nacional del consumo de carne de cerdo se debe a distintos factores, entre los cuales destacan que México es un país en desarrollo, por lo que la mayor parte de los sistemas de producción porcina son semi-intensivos y familiares; además, la porcicultura mexicana posee un esquema administrativo tradicional, aspecto que privilegia como estrategia de la maximización de sus recursos escasos a la tecnología, sin que esta logre incrementar la producción y disminuir los costos de producción para enfrentar la competencia de las empresas porcinas del sector internacional (Gómez *et al.*, 2012; Ortiz-Rodríguez, 2019).

Aunado a los problemas descritos anteriormente, el sector porcino de México requiere ser eficiente tanto productiva como económicamente; para ello, los poricultores del país necesitan analizar diversas estrategias tales como incremento en la prolificidad de las cerdas, incremento en el número de lechones destetados por camada y/o eficientizar la línea de producción (cerdos de 6-100 kg), ello con el objetivo de disminuir el tiempo en el proceso de destete a la finalización (90-100 kg). Sin embargo, para que esto se logre, es esencial optimizar las fases inherentes a la producción del cerdo; dentro de estas, la fase de destete-iniciación es la más compleja debido a los cambios estresantes que experimenta el lechón al destetarse y durante las primeras semanas postdestete (Choudhury *et al.*, 2021).

El estrés postdestete produce una serie de eventos en el organismo del lechón que ocurren simultáneamente y que repercuten principalmente en el sistema gastrointestinal y culminan con el retraso del crecimiento del lechón (Tang *et al.*, 2022); por esta razón, se han buscado

estrategias y medidas preventivas para superar el desfase productivo de los lechones en la fase de iniciación (Monger *et al.*, 2021; Canibe *et al.*, 2022), dentro de dichas estrategias los alimentos nutraceuticos han mostrado ser una alternativa viable (Das *et al.*, 2020).

Entre los alimentos con actividad nutraceutica se encuentra el nopal (*Opuntia spp*) el cual puede ser utilizado en la alimentación del cerdo (Ordaz *et al.* 2020) debido a las distintas propiedades que se le han atribuido, tales como: antiinflamatorio, antioxidante, prebiótico, hipoglucemiante, hipocolesterolémico, entre otras (Elshehy *et al.*, 2020). Sin embargo, dichas propiedades no se han estudiado en lechones. Además, se ha establecido que tanto la mano de obra para el picado, el suministro del nopal a los cerdos y la corta vida de anaquel de esta cactácea no hacen viable su uso a gran escala (Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2023). Por lo que, se han evaluado alternativas y procesos que permitan conservar el nopal por más tiempo y en donde sus propiedades no se vean afectadas (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2022).

Dentro de las alternativas para conservar el nopal se encuentra la extrusión, proceso que abarca la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo (Choton *et al.*, 2020); que, para el caso del nopal, este proceso plantea serias ventajas; puesto que esta cactácea pierde ciertos compuestos (fenoles, flavonoides y actividad antioxidante) cuando se somete a una temperatura mayor a los 50°C (Pérez, 2021). Por lo que, la extrusión al no requerir de temperaturas > 50°C evita el riesgo de la pérdida de componentes fitoquímicos del nopal. Sin embargo, no se ha estudiado el efecto de la adición de nopal extrusado a la dieta de los cerdos sobre la salud del tracto gastrointestinal y su relación con variables productivas. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la adición de nopal (*O. ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación sobre citocinas proinflamatorias, integridad intestinal, metabolitos energéticos y productividad.

Hipótesis

- El proceso de extrusión de nopal (*Opuntia ficus-indica*) no modifica sus componentes ni sus propiedades fisicoquímicas.
- La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en la primera semana postdestete disminuye la concentración de citocinas proinflamatorias por su contenido de flavonoides y compuestos fenólicos con acción antioxidante y antiinflamatoria.
- La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones destetados mejora la integridad de las vellosidades intestinales por su contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos.
- La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) puede disminuir los niveles de glucosa, colesterol y triglicéridos sanguíneos por su contenido en fibra.
- La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) mejora el comportamiento productivo de estos como lo hace en nopal en base fresca.

Objetivo General

Determinar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre citocinas proinflamatorias, integridad de vellosidades intestinales, metabolitos energéticos y variables productivas.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre la concentración sérica de citocinas proinflamatorias.
- Establecer el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre la integridad de las vellosidades intestinales.
- Determinar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre glucosa, colesterol y triglicéridos sanguíneos.
- Evaluar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (6-30 kg) sobre el consumo de alimento y las variables productivas.

Metodología General

Etapa Preexperimental

Se utilizaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), mismos que se obtuvieron de una parcela perteneciente a la Unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada en el Municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O; además de contar con un clima templado con una temperatura promedio anual de 21°C y humedad relativa de 62%, con lluvias en verano (INEGI, 2017).

La recolección de los cladodios se realizó en el período junio-julio del 2023, la edad promedio de los cladodios fue de 3.5 meses. Recolectados los cladodios fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH en donde fueron procesados a través de la técnica de extrusión tanto en base fresca (BF) como cocidos al vapor (CocV) a 100°C por 4 minutos. Con los 4.0 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): T1 o Testigo (n= 1.0 kg), nopal en BF; T2 (n= 1.0 kg), Nopal CocV; T3 (n= 1.0 kg), extrusado de nopal en BF y T4 (n= 1.0 kg), extrusado de nopal CocV.

En el proceso de extrusión del nopal se utilizó 1.0 kg de nopal en BF (T3) y 1.0 kg de nopal CocV (T4). Los cladodios de nopal para el T3 y T4 se cortaron en porciones de 2.0 cm³ para colocarlos en una licuadora (Oster- BLST4127) de uso doméstico y facilitar el molido. Una vez obtenida la pasta del nopal molido, esta se distribuyó en tres bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio desechables (Ekco®) de forma uniforme y con un espesor aproximado de 1.0 cm. Posteriormente se colocaron en la deshidratadora (horno con ventilación forzada) con capacidad para 8.0 kg. La deshidratadora fue programada a 50°C y a 20% de humedad.

Durante el proceso de deshidratación, la pasta de nopal se monitoreó cada 30 minutos hasta que esta alcanzó una humedad de 35 a 37%. Una vez que se obtuvo la humedad $\leq 37\%$ en la pasta de nopal se sacó de la deshidratadora y se procedió con el proceso de extrusión, utilizando para ello un molino (fabricado en China) manual específico para dicho proceso. Obtenido el

extrusado de nopal en BF se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevaron a la deshidratadora hasta alcanzar una humedad entre 10 y 12% (DOF: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Para el proceso de extrusión del nopal CocV, primeramente, se preparó 1.0 kg de nopal en BF fraccionándolos en trozos de 2.0 cm³. Posteriormente se sometieron a cocción a vapor a 100°C por cuatro minutos en una olla de uso doméstico (Vasconia®) con capacidad de 5.0 L, ello de acuerdo con la técnica establecida por Ortiz *et al.* (2022). Una vez transcurrido los 4 minutos de cocción, se procedió a moler los fragmentos de nopal CocV en una licuadora de uso doméstico y se procedió a realizar el proceso de extrusión, al igual como se realizó con el nopal en BF.

Las variable evaluadas/tratamiento fueron: humedad, materia seca, fibra cruda, extracto etéreo, proteína cruda, extracto libre de nitrógeno, cenizas, flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante por captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Para la determinación del análisis fisicoquímico se utilizó la metodología del análisis químico proximal y, para la determinación de los metabolitos secundarios se utilizó la metodología de análisis fitoquímico. Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH. La información recabada se analizó a través de ANOVA y las diferencias entre tratamientos se obtuvo mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Etapas experimental

La investigación se llevó a cabo en el Sector porcino de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-UMSNH ubicada en el municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O (INEGI, 2017).

Para el logro del objetivo de esta investigación, la fase experimental (6 semanas) se dividió en dos etapas: Etapa 1, adaptación a la fase de iniciación y Etapa 2, post-adaptación a la fase de iniciación; la Etapa 1 abarcó los primeros 14 días (2 semanas) postdestete, mientras que la Etapa 2 tuvo una duración de 28 días (4 semanas), del día 15 al 42 de la fase de iniciación.

Se utilizaron 30 lechones destetados (21±2 días de edad) de ambos sexos seleccionados al azar, con un peso de 7.2±0.8 kg. En la etapa de adaptación a la fase de iniciación (Etapa 1), con los

30 lechones se conformaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹; lechón⁻¹ fue considerado como la unidad experimental): Grupo 1 o testigo (GT), a cada lechón de este grupo se le proporcionó alimento comercial convencional específico para la etapa 6 a 25 kg de peso vivo; Grupo 2 (GNBF), en este grupo a cada lechón se le ofreció alimento convencional para esta etapa adicionado con 1.0% de nopal en BF (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) y Grupo 3 (GNEx), al cual se le proporcionó alimento convencional con la adición de 0.01% de extrusado de nopal (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón).

Etapas 2, transcurridos 14 días de la primera etapa de la fase experimental, se seleccionaron al azar cinco lechones del GT, los cuales formaron el subgrupo GTa. Mientras que el GNBF y GNEx se subdividieron en dos subgrupos cada uno ($n= 5$ lechones subgrupo⁻¹): GNBFa, GRNBF, GNExa, GRNEx. El GTa, continuó con el alimento comercial específico para la fase de iniciación (FI); GNBFa, continuó con el alimento para FI más nopal en BF y al GRNBF, se le retiró la adición del nopal y solo se le suministró alimento para la FI; al GNExa se continuó con la adición de extrusado de nopal y alimento convencional, y al GRNEx únicamente se le suspendió la adición de extrusado de nopal. La formación de los subgrupos tuvo como objetivo determinar si existió efecto residual de la dieta adicionada con nopal (extrusado y/o en BF) en el comportamiento productivo de estos animales durante esta etapa.

Cada lechón grupo⁻¹ se confinó en jaula individual elevada al piso, la cual contenía: un comedero de aluminio confeccionado especialmente para la alimentación individual (28x16 cm; Largo y Ancho, respectivamente) y un bebedero automático tipo chupón. El alimento convencional para la fase de iniciación suministrado a los grupos y el agua de bebida se ofrecieron *ad libitum*.

El nopal forrajero (*O. ficus-indica*) suministrado (tanto en BF como para el extrusado) se obtuvo de una parcela ubicada en la comunidad de Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, con coordenadas: 20.19694 N y 101.69861 O, a una altura de 2140 msnm, con temperaturas mínimas de 7°C y máximas de 30°C y una precipitación pluvial media de 20 mm (INEGI, 2017). Los cladodios seleccionados fueron de una edad de tres meses. En caso de la adición en BF, una vez cosechados estos fueron picados en trozos de aproximadamente 1.0 cm² para poder ser suministrados a los cerdos. Para el caso del extrusado, este se realizó como se mencionó en la fase preexperimental.

Las variables por analizar cerdo⁻¹ grupo⁻¹ fueron: consumo de alimento, peso semanal, ganancia de peso, consumo de alimento comercial total e índice de conversión alimenticia. La información recabada se analizó a través de la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello el modelo de efectos fijos y las diferencias entre grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Toma de muestras y Análisis de Laboratorio

Se obtuvieron muestras de sangre (previo ayuno de 4 h) los días 0, 3, 7, 14, 28 y 42 postdestete. Se tomaron 5 ml de sangre lechón⁻¹ de la vena yugular con jeringa de 5.0 mL y aguja calibre 22G. Inmediatamente después de la toma de muestra, se colocaron en tubos BD Vacutainer® con activador de coagulación y gel separador de suero, y posteriormente se centrifugaron (2,000 rpm durante 10 minutos). El suero obtenido se mantuvo congelado -20°C hasta ser analizado.

Para la determinación de la concentración sérica de interleucinas 1 β (IL-1 β) y 12 (IL-12) y concentración sérica de factor de necrosis tumoral- α (TNF- α), las muestras sanguíneas se trasladaron para su análisis al Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en Jiutepec, Morelos, México.

Para la evaluación de los indicadores bioquímicos, esta se realizó mediante técnica enzimática/colorimétrica en un aparato EasyVet KONTROLab®. Los reactivos utilizados fueron: GLUCOSE-LQ (ref. 41010; lot. LIQ308; España) para glucosa sanguínea, CHOLESTEROL-LQ (ref. 41022; lot. LIQ454; España) para colesterol total en sangre y, TRIGLYCERIDES-LQ (ref. 41032; lot. LIQ595; España) para triglicéridos sanguíneos.

La información recabada se analizó a través de la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello el modelo de efectos fijos y las diferencias entre grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Al concluir la etapa de adaptación a la fase de iniciación (14 días post-destete), se seleccionaron tres cerdos al azar (un lechón/grupo), mismos que fueron eutanasiados de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM) para el sacrificio humanitario de los animales domésticos (NOM-033-ZOO-1995). Inmediatamente después de la eutanasia de los animales, se extrajo el intestino

delgado y se obtuvieron muestras del duodeno, yeyuno e íleon (10 cm/porción intestinal) para el análisis histológico, el cual se realizó mediante la técnica de inclusión en parafina y con la tinción de hematoxilina y eosina.

Se analizaron largo y ancho de las vellosidades intestinales (VI), profundidad de criptas (PCrip), relación Vellosidad:Cripta (R-VI:Crip) y área de absorción (Abs). Las estructuras de las VI se determinaron utilizando un microscopio Leica DM750P con objetivo de 4x, y el largo y ancho de las VI, así como la P-Crip se obtuvieron mediante un analizador de imágenes Leica Application Suite V4® (LAS V4®). La R-VI:Crip se determinó dividiendo la altura de la vellosidad entre la P-Crip. Mientras que, para determinar el Abs se multiplicó la altura por el ancho de la VI. La información recabada se analizó mediante la metodología de los modelos lineales generalizados (Littell *et al.*, 2002) y las diferencias entre grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

CAPÍTULO I

EFFECTO DEL PROCESO DE EXTRUSADO DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) SOBRE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS y METABOLITOS SECUNDARIOS

Resumen

Se determinó el efecto del proceso de extruido de nopal en base fresca (BF) y cocido al vapor (CocV) sobre sus propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios. Se utilizaron 4.0 kg de nopal (*O. Ficus-Indica*), distribuido en cuatro tratamientos (T): T1 o testigo, nopal BF; T2, nopal CocV; T3, extrusado de nopal BF y T4, extrusado de nopal CocV. Se valuó tratamiento⁻¹: humedad (Hm), materia seca (MS), fibra cruda (FC), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), extracto libre de nitrógeno (ELN), cenizas (Cen), flavonoides totales (FLAV), fenoles totales (FEN) y actividad antioxidante (AcA) por captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). La información se analizó a través de ANOVA y las diferencias entre tratamientos se obtuvo mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha < 0.05$. Se encontró que, la FC en el extrusado de nopal (3.4 y 7.5%, para T3 y T4, respectivamente) fue menor ($p < 0.05$) vs tratamientos sin extruir (28.8 y 13.2%, para T1 y T2 respectivamente); en PC, el T3 mostró el mayor ($p < 0.05$) valor (13.0%) seguido de T2 (9.2%) y T4 (9.0%); en EE, no se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre tratamientos ($\leq 4.4\%$); en ELN, el nopal extrusado mostró ($p < 0.05$) mayores valores (63.0 y 74.1%, para el T3 y T4, respectivamente) vs nopal BF (T1) y CocV (T2); en Cen, el valor mayor ($p < 0.05$) fue para el T1 (16.2%) vs T2, T3 y T4. Para FLAV, estos fueron mayores en el nopal extrusado (2.2 y 2.6 mg EQ/g para T3 y T4, respectivamente) vs nopal BF y CocV; en FEN, se observó mayor concentración en nopal BF y CocV (3.4 y 4.6 mg EAG/g, respectivamente) vs extrusados de nopal; para la AcA. los valores de los extrusados de nopal fueron iguales entre sí ($p > 0.05$) (21.6 y 23.2% para T3 y T4, respectivamente) y mayores ($p < 0.05$) a nopal BF y CocV (12.2 y 5.8%, respectivamente). El proceso de extrusión del nopal en BF mejora los contenidos de PC, ELN, cenizas y FLAV, pero provoca disminución de FC y FEN.

Palabras clave: Contenido nutricional, Antioxidante, Procesamiento de alimento.

Introducción

Desde la antigüedad, el nopal ha sido importante en la cultura mexicana como parte de la gastronomía, agricultura y medicina (FAO, 2018; SADER, 2020). Pero, actualmente, el nopal y sus frutos (Tuna y *Joconostle*) son de interés alrededor del mundo (SIAP, 2023). Las principales especies cultivadas en el país son *O. ficus-indica*, *O. joconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Portillo *et al.*, 2021) y, en el año 2022, la producción de estas cactáceas alcanzó un total de 872.3 miles de toneladas y se exportaron 63,387 toneladas (SIAP, 2023).

El interés a nivel global por el nopal, se debe -en parte- al cambio climático y las sequías prolongadas (FAO, 2018), pues esta planta tiene capacidad de adaptación a climas áridos y semiáridos (Portillo *et al.*, 2021); es una fuente de alimento para humanos (Quishpi, 2021) y animales (Ordaz *et al.*, 2019); posee propiedad hipoglucemiante, hipocolesterolémico, antioxidante, antiinflamatorio y antibacteriano, aspectos de importancia para la salud humana y animal (El-Mostafa *et al.*, 2014). Pero, sus desventajas son: bajo contenido de proteína ($\leq 5.0\%$), por lo que no puede usarse como único insumo en la alimentación animal y alto contenido de agua ($\geq 90\%$) (Ortiz *et al.*, 2022) que impide su conservación por largo tiempo una vez cosechado; por esta razón, se han buscado distintos procesos y técnicas de conservación para el nopal (Pérez, 2021).

Uno de los procesos de conservación del nopal es la cocción al vapor, técnica que mejor conserva el valor nutricional de los alimentos, puesto que permite mantener la forma, consistencia y sabor de estos y, además, aumenta la digestibilidad de la fibra alimentaria (Achón *et al.*, 2018; Ortiz *et al.*, 2022). En cuanto al proceso de harinificación del nopal, este puede disminuir la digestibilidad y alterar los componentes de la planta. Aspecto que presenta una desventaja dentro de los procesos de conservación de esta cactácea (Elizondo, 2010).

Otras alternativas para la conservación de los alimentos son la peletización y la extrusión; para el primer caso, se compactan distintos ingredientes para formar “pellets” a través de presión, temperatura y humedad (Loor-Mendoza, 2016). Sin embargo, al someter al nopal a temperaturas mayores a 50°C se pueden perder antioxidantes y flavonoides (Pérez, 2021). Mientras que para el segundo caso (extrusión), este es un proceso para los alimentos sensibles a altas temperaturas; puesto que, la extrusión abarca la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo; además trae consigo ventajas tanto técnicas como de costo y calidad (Gutiérrez *et al.*, 2017).

Por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del proceso de extrusado de nopal en base fresca y cocido al vapor sobre sus propiedades fisicoquímicas y metabolitos secundarios.

Material y Métodos

Para el logro del objetivo de esta investigación se utilizaron 4.0 kg de nopal (*O. ficus-indica*), mismos que se obtuvieron de una parcela perteneciente a la Unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-UMSNH, ubicada en el Municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O; además de contar con un clima templado con una temperatura promedio anual de 21°C y humedad relativa de 62%, con lluvias en verano (INEGI, 2017).

La recolección de los cladodios se realizó en el período junio-julio del 2023, dichos cladodios tenían una edad promedio de 3.5 meses. El peso de los cladodios se obtuvo con una báscula digital (Truper 15161). Recolectados los cladodios fueron llevados al Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH en donde fueron procesados a través de la técnica de extrusión tanto en base fresca (BF) como cocidos al vapor (CocV) a 100°C por 4 minutos. Con los 4.0 kg de nopal se conformaron cuatro tratamientos (T): T1 o Testigo (n= 1.0 kg), nopal en BF; T2 (n= 1.0 kg), Nopal CocV; T3 (n= 1.0 kg), extrusado de nopal en BF y T4 (n= 1.0 kg), extrusado de nopal CocV.

En el proceso de extrusión de nopal en BF, los cladodios para el T3 y T4 se cortaron en porciones de 2.0 cm³ para colocarlos en una licuadora (Oster- BLST4127) de uso doméstico y facilitar el molido. Una vez obtenida la pasta del nopal molido, esta se distribuyó en tres bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio desechables (Ekco®) de forma uniforme y con un espesor aproximado de 1.0 cm. Posteriormente se colocaron en la deshidratadora (horno con ventilación forzada) con capacidad para 8.0 kg. La deshidratadora fue programada a 50°C y a 20% de humedad.

Durante el proceso de deshidratación, la pasta de nopal se monitoreó cada 30 minutos hasta que esta alcanzó una humedad de 35 a 37%; humedad óptima para realizar el proceso de extrusión de acuerdo con las pruebas piloto previas. Una vez que se obtuvo la humedad $\leq 37\%$ en la pasta

de nopal se sacó de la deshidratadora y se procedió con el proceso de extrusión, utilizando para ello un molino® (fabricado en China) manual específico para dicho proceso. Obtenido el extrusado de nopal en BF se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevaron a la deshidratadora hasta alcanzar una humedad entre 10 y 12% (DOF: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Para el proceso de extrusión del nopal CocV, primeramente, se preparó 1.0 kg de nopal en BF fraccionándolos en trozos de 2.0 cm³. Posteriormente se sometieron a cocción a vapor a 100°C por cuatro minutos en una olla de uso doméstico (Vasconia®) con capacidad de 5.0 L, ello de acuerdo con la técnica establecida por Ortiz *et al.* (2022). Una vez transcurrido los 4.0 minutos de cocción, se procedió a moler los fragmentos de nopal CocV en una licuadora de uso doméstico y se procedió a realizar el proceso de extrusión, al igual como se realizó con el nopal en BF.

Las variable evaluadas tratamiento⁻¹ fueron: humedad (Hm), materia seca (MS), fibra cruda (FC), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), extracto libre de nitrógeno (ELN), cenizas (Cen), flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante por captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo). Para la determinación del análisis fisicoquímico se utilizó la metodología del análisis químico proximal (AQP) y para la determinación de los metabolitos secundarios se utilizó la metodología de análisis fitoquímico. Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA) de la Facultad de Químico Farmacobiología-UMSNH.

La determinación de Hm y MS se realizó mediante una termobalanza (OHAUS® MB33) en la que se colocaron 2.0 g de muestra/tratamiento; mientras que para la determinación de FC, se utilizó una muestra de 2.0 g/tratamiento y se determinó a través del método de hidrólisis ácida y alcalina; en el caso de la determinación de PC, esta se obtuvo a través de una muestra de 0.7 g/tratamiento y se determinó mediante el método Kjeldahl con factor de conversión de 6.25; para el EE, se utilizó una muestra de 2.0 g/tratamiento y se determinó mediante la metodología de la extracción con éter en un equipo Soxhlet; para Cen, se utilizaron 2.0 g/tratamiento y su determinación fue mediante la incineración en mufla a 550°C; el ELN se obtuvo por diferencia, restando a 100% los valores obtenidos de FC, PC, EE y Cen; lo anterior de acuerdo a los métodos del manual de la AOAC (1998).

Para el caso de la determinación de metabolitos secundarios (flavonoides totales, fenoles totales) y actividad antioxidante (DPPH), se preparó el extracto disolviendo 10.0 g de nopal en 100 mL de alcohol, 24 horas después se filtró en total oscuridad para su medición. Posteriormente se determinaron los fenoles totales utilizando la metodología de Singleton *et al.* (1999) y Taga *et al.* (1984) con algunas modificaciones, se añadieron 100 μ L del extracto, inmediatamente después se agregó 100 μ L de la solución a 100 μ L del reactivo de Folin-Ciocalteu (1 N); esta mezcla se agitó y después de tres minutos en reposo se añadieron 2 mL de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 2% m/v, se agitó nuevamente y se incubó en la oscuridad durante 30 minutos. Posteriormente se midió a una absorbancia a 750 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, Perkin Elmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de gálico ácido por gramo de extracto (mg EAG/g).

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante la metodología de Dewanto *et al.* (2002), con algunas modificaciones. Se añadieron 1400 μ L del extracto, 600 MeOH y 600 μ L de cloruro de aluminio, se reposó 30 min y posteriormente, se midió a una absorbancia de 415 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de quercetina por gramo de extracto (mg EQ/g). La curva de calibración fue construida usando quercetina a 0–30 μ g.

La determinación del porcentaje de inhibición DPPH se basó en el método descrito por Brand-Williams (1995), con algunas modificaciones. Los reactivos que se utilizaron fueron diluidos con MeOH. La concentración de DPPH fue de 6×10^{-5} M. Para la prueba se tomó 100 μ L de extracto y se mezcló con 1900 μ L de solución de DPPH y se mantuvo en la oscuridad durante 15 minutos. La absorbancia se midió a una longitud de onda de 515 nm en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA 365, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, EE. UU.), los resultados se expresaron en % de inhibición.

La información recabada se analizó a través de ANOVA y las diferencias entre tratamientos se obtuvo mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Variable respuesta: Fibra, Cenizas, Proteína, Extracto Etéreo, ELN, Flavonoides, Polifenoles, actividad antioxidante (DPPH).

μ = Promedio general

T_i = Efecto fijo del Tratamiento con i ésimo Tratamiento= T1, T2, T3, T4.

e_{ij} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma^2_e$).

Resultados

Análisis fisicoquímico del nopal (O. ficus-indica) de acuerdo con el tratamiento

Los resultados del análisis fisicoquímico de los tratamientos del nopal determinaron efecto ($p<0.0001$) de tratamiento sobre: FC, PC, ELN y Cen (Tabla 1). Para el EE, no se encontró efecto ($p>0.05$) de tratamiento (Tabla 1). En este sentido, el porcentaje de FC fue mayor ($p<0.05$) en T1 (nopal en BF) ($28.8\pm 2.1\%$) respecto a T2 (nopal CocV), T3 (extrusado de nopal en BF) y T4 (extrusado de nopal CocV); mientras que, los valores menores de FC se observaron en T4 ($3.4\pm 1.2\%$) (Tabla 1).

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis fisicoquímico del nopal de acuerdo con el tratamiento.

Variable, %	NOPAL			EXTRUSADO DE NOPAL		
	BF (T1)	CocV (T2)	E.E.	BF (T3)	CocV (T4)	E.E.
	Media	Media		Media	Media	
FC	28.8 ^a	13.2 ^b	2.1	7.5 ^c	3.4 ^d	1.2
PC	7.0 ^a	9.2 ^b	0.5	13.0 ^c	9.0 ^b	0.3
EE	3.4	4.4	1.0	3.1	3.6	0.6
ELN	44.7 ^a	59.8 ^b	2.4	63.0 ^b	74.1 ^c	1.4
Cenizas	16.2 ^a	13.5 ^b	0.2	13.5 ^b	12.8 ^c	0.1

EE= Error estándar; PC=Proteína cruda; EE=Extracto etéreo; ELN=Extracto libre de nitrógeno; BF=Base frasca; CocV=Cocido al vapor. Literales ^{a,b,c,d} indican diferencias significativas entre tratamientos (filas) ($p<0.05$).

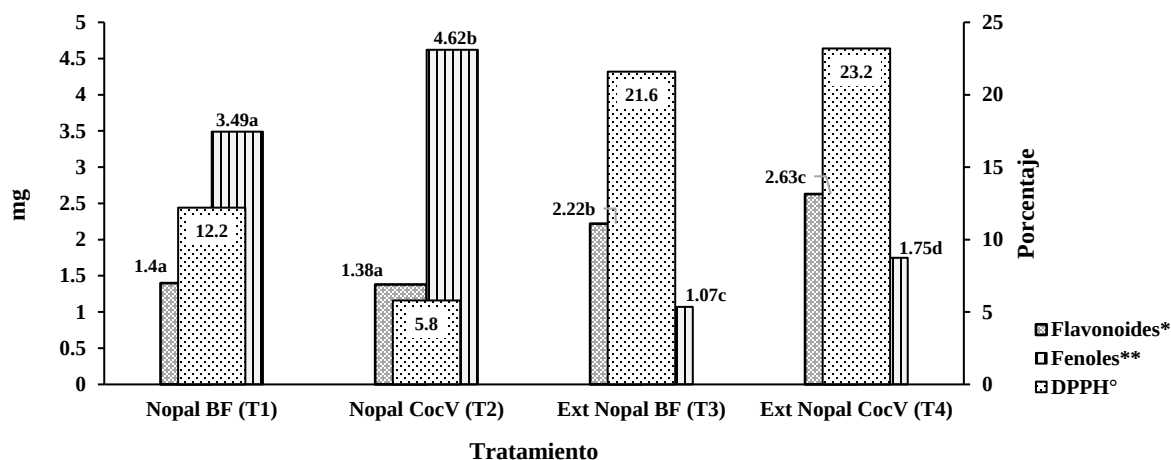
Respecto a PC (Tabla 1), se observaron diferencias ($p<0.05$) entre tratamientos: el T3 mostró mayor ($p<0.05$) porcentaje ($13.0\pm 0.3\%$) respecto al resto de los tratamientos analizados. Sin embargo, los T2 y T4 mostraron similitud ($p>0.05$) en PC (9.2 y 9.0%, respectivamente); pero, mayor ($p<0.05$) al del T1 (Tabla 1).

En cuanto a los resultados del EE, los valores encontrados fueron similares ($p>0.05$) en los cuatro tratamientos analizados: entre 3.1 y 4.4% (Tabla 1). Mientras que, para el ELN, el T4 ($74.1\pm 1.4\%$) mostró el mayor ($p<0.05$) valor, seguido de T2 ($59.8\pm 2.4\%$) y T3 ($63.0\pm 1.4\%$); ambos promedios similares entre sí ($p>0.05$) (Tabla 1). En el caso de Cen, el T1 fue el que

mayor ($p<0.05$) porcentaje presentó ($16.2\pm0.2\%$) en comparación con el resto de los tratamientos analizados (Tabla 1); pero, el T2 y T3 mostraron valores similares ($p>0.05$) entre sí (13.5 ± 0.2), pero mayores al T4 ($12.8\pm0.1\%$).

Metabolitos secundarios del nopal de acuerdo con el tratamiento

Con respecto a los resultados de metabolitos secundarios, se encontró efecto de tratamiento ($p<0.0001$) sobre FLAV, FEN y AcA o porcentaje de inhibición DPPH. Los mayores valores de FLAV se encontraron en T3 y T4 (2.22 y 2.63 mg EQ/g, respectivamente) vs T1 y T2 (Figura 1), mismos que presentaron promedios similares entre sí ($p>0.05$). En el caso de FEN, los cuatro tratamientos analizados presentaron valores diferentes entre sí ($p<0.05$), siendo el T2 quien mostró la mayor concentración (4.62 mg EAG/g); mientras que, el T3 mostró menor concentración promedio ($p<0.05$) de FEN (1.07 mg EAG/g) (Figura 1).



Ext= Extrudado; BF= Base fresca; CocV= Cocido al vapor; *=EQ/g; **=EAG/g; °=Porcentaje
Literales a, b, c, d, indican diferencias ($p<0.05$) entre promedios de acuerdo a tratamiento y metabolito

Figura 1. Medias de mínimos cuadrados para metabolitos secundarios del nopal (*O. ficus-indica*) de acuerdo con el tratamiento

En cuanto al porcentaje de AcA (DPPH), los valores del T3 y T4 fueron iguales entre sí ($p>0.05$) (21.6 y 23.2%) y mayores ($p<0.05$) a los obtenidos en el T1 y T2 (Figura 2).

Discusión

El proceso de extrusado de nopal modifica los compuesto químicos de esta cactácea, puesto que los valores de tratamiento testigo (T1) así lo demuestran (Tabla 1). Al respecto, la FC disminuye cuando el nopal en BF o CocV se sometió al proceso de extrusado e incluso, disminuyó bajo el

tratamiento de CocV (T2) (Tabla 1). Es posible que los porcentajes de FC, específicamente los extrusados, presentaran bajos contenidos de FC debido a que el nopal (BF y CocV) se sometió a altas temperaturas: para la CocV se requirió 100°C y en el proceso de extrusión se requirió de 50°C para su deshidratación.

González (2002) sugirió que, las altas temperaturas promueven la ruptura de los componentes de la fibra, lo que puede ocasionar la expresión de valores menores de dicha variable. Aspecto que también se observó en la investigación de Ahumada (2021): menor FC en el nopal CocV (19.0%) vs nopal en BF (31.5%); sin embargo, los valores reportados por el citado investigador son mayores a los encontrados en nopal BF y CocV en esta investigación (Tabla 1); aun y cuando en ambas investigaciones la edad de los cladodios utilizados fue similar (≥ 90 días de edad).

Es posible que las diferencias de FC del nopal en BF o CocV, respecto a los reportado por Ahumada (2021), estén asociadas a la época del año en la que se realizó la recolección de los cladodios. Al respecto, Pérez *et al.* (2015) reporta valores de FC en cladodios de 90 días de 31.7 y 18.6% para la época de estiaje y de lluvias, respectivamente. Por lo que, no solo el proceso de extrusado y la CocV afectan los valores de FC del nopal, sino que también, la época del año en la que se recolecten y procesen los cladodios de nopal.

Otro componente químico del nopal que fue afectado por el proceso de extrusado y la CocV fue la PC (Tabla 1). Al respecto, Ortiz *et al.* (2022), reporta mayor porcentaje de PC (17.6%) en el nopal CocV vs nopal BF (14.3%); fenómeno similar a los observado en esta investigación; sin embargo, los contenidos de PC fueron menores (Tabla 1) a los reportados por Ortiz *et al.* (2022).

En cuanto al proceso de extrusión del nopal, la PC se incrementó en el extrusado de nopal en BF (T3) en comparación con el extrusado de nopal CocV (T4) (Tabla 1). Pérez-Sánchez *et al.* (2015), reporta porcentaje de PC en el nopal en BF mayores ($p < 0.05$) en cladodios jóvenes en comparación con los adultos (4.4 y 8.3%, respectivamente) y, de acuerdo con la época del año, existe un cambio de PC, siendo mayor ($p < 0.05$) en época de lluvias (5.9%) vs época de estiaje (4.4%).

Ramírez-Moreno *et al.* (2013) establecieron que, cuando se someten los cladodios a agua a temperatura $\geq 90^\circ\text{C}$ durante 20 minutos se incrementa la PC, puesto que a bajo estas condiciones

se rompen algunas atracciones hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno o enlaces electrostáticos y provocar que las proteínas se unan con carbohidratos, lípidos, compuestos de fibra, entre otros más. Así, cuando se aplica calor, se rompen los enlaces entre la proteína y otros compuestos químicos y, por ello, se cuantifica mayor cantidad de proteína.

En cuanto a los valores de cenizas (Cen), Ortiz *et al.* (2022) reporta valores de 27.8 y 20.9% en nopal en BF y nopal CocV, valores superiores a los encontrados en esta investigación; sin embargo, coinciden en un mayor porcentaje en el nopal en BF vs CocV (Tabla 1). Moreno *et al.* (2015), también reportó dicho efecto al someter a la papa (*Puca Shungo*) a procesos térmicos. Dicha disminución puede atribuirse a la filtración de los minerales solubles hacia el agua de cocción durante un proceso térmico acuoso (Ahmed *et al.*, 2013).

Por último, en lo que se refiere a los metabolitos secundarios, en la presente investigación se pudo observar que los valores de flavonoides (Figura 1) fueron similares a los reportados por Guevara *et al.* (2010), Pérez (2021) y Manzanarez *et al.* (2022) en el nopal en BF, quienes indican valores de 2.0, 1.7 y 3.1 mg EQ/g, respectivamente. Pero, el aumento de los flavonoides en los extrusados de nopal (T3 y T4; Figura 1) pudo deberse a que la compresión mecánica durante la extrusión puede romper las paredes celulares de las plantas y liberar los compuestos encapsulados (Navarro *et al.*, 2020), lo que podría permitir que los flavonoides que estaban atrapados en las células sean liberados y se vuelvan más disponibles para su medición.

Para el caso de los fenoles totales, los valores obtenidos (Figura 1) concuerdan con lo reportado por Ramírez *et al.* (2013), quienes encontraron valores similares a los de la presente investigación: 3.7 y 5.7 mg EAG/g para nopales de 30 días de edad liofilizado y cocido, respectivamente. Manzanarez *et al.* (2022), reportaron valores de fenoles en nopal morado y verde de 2.3 y 2.1 mg EAG/g, respectivamente. Lo que pudiera sugerir que las concentraciones de este metabolito secundario están determinadas no solo por el tratamiento térmico, sino también, por la edad y la variedad del nopal que se trate. Por ejemplo, para Martínez *et al.* (2015), la deshidratación del nopal mediante la aplicación de calor provoca que los niveles de fenoles disminuyan considerablemente.

Finalmente, respecto a los resultados del porcentaje de inhibición DPPH (Figura 1), estos fueron mayores en los extrusados de nopal en BF y CocV vs nopal BF y nopal CocV; pero, menores a los reportados por Figueroa *et al.* (2018): 46.1 y 48.1%, para nopal verdura viejo (30 días) y

joven (12 días de edad), respectivamente. Mientras que Pérez (2021), reporta valores de inhibición de 40.5 y 45.7% en nopal forrajero de 90 días de edad, deshidratado a 50°C y liofilizado, respectivamente. Esta variación en los resultados de la actividad antioxidante en el nopal puede ser multifactorial: deshidratación mediante aire caliente (Karam *et al.*, 2016), variedad, madurez de los cladodios, temperatura, textura y grosor de los cladodios, presencia de oxígeno e incluso, la técnica de extracción de los antioxidantes (Kamiloglu *et al.*, 2015).

En general, el efecto del proceso del extrusado de los alimentos sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante, pueden estar sujetos a múltiples factores, incluidos la naturaleza de los metabolitos, las condiciones específicas de extrusión y los componentes totales de los alimentos (Mironeasa *et al.*, 2023). En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación determinaron que el proceso de extrusado provocó una mayor medición de metabolitos secundarios y su efecto antioxidante (Figura 1).

Conclusión

En el proceso de extrusión del nopal en BF o CocV se pierde fibra cruda, minerales (cenizas) y fenoles totales, pero se mejoran los contenidos de proteína cruda, extracto libre de nitrógeno, flavonoides totales y actividad antioxidante (DPPH), ello de acuerdo con los contenidos en el nopal en BF. Sin embargo, en el extrusado de nopal CocV se requiere un mayor gasto de energía, puesto que implica la cocción a vapor a 100°C por 4 minutos y el proceso de extrusión. Por lo que, el extrusado de nopal en BF es la estrategia más viable para procesar, almacenar y suministrar el nopal (*O. ficus-indica*) a los animales.

Bibliografía

- Achón T.M., González G.P., Varela M.G. 2018. “Criterios de armonía funcional entre gastronomía y salud: una visión desde la comunidad científica”. *Nutrición Hospitalaria*. 35: 75-84.
- Ahmed, F.A. y Ali, R.F.M. 2013. “Bioactive compounds and antioxidant activity of freshand processed white cauliflower”. *BioMed Research International*. 2013: 1-9.
- Ahumada G.J.T. 2021. “Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cocido a la dieta de cerdas postparto sobre: perfil metabólico y consumo voluntario de alimento”. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

- Arias L., Gómez L.J., Zapata J.E. 2017. “Efecto de Temperatura-Tiempo sobre los Lípidos extraídos de Visceras de Tilapia Roja (*Oreochromis* sp.) utilizando un proceso de calentamiento-congelación”. *Información Tecnológica*. 28: 131-142.
- Bernhardt, S. and Schlich, E. 2006. “Impact of different cooking methods on food quality: Retention of lipophilic vitamins in fresh and frozen vegetables”. *Journal of Food Engineering*, 77: 327–333.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C. 1995. “Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity”. *LWT-Food Science and Technology*. 28: 25–30.
- Damodaran, S. & Parkin, K.L. 2017. “Fennema's Food Chemistry”. *CRC Press*. 5, 122.
- Dewanto, V., Wu X., Adom, K.K., Liu, R.H. 2002. “Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50: 3010–3014.
- Norma Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018. “Alimentos para animales, determinación de humedad en alimentos balanceados e ingredientes mayores”. Diario oficial de la federación. SEGOB.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541957&fecha=24/10/2018#gsc.tab=0
- Elizondo A.E. 2010. “Evaluación del efecto de dietas formuladas con o sin harinas de origen animal en el rendimiento de pollos de engorde”. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- El-Mostafa K., El Kharrassi Y., Badreddine A., Andreoletti P., Vamecq J., El Kebbj M., Cherkaoui-Malki M. 2014. “Nopal Cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a Source of Bioactive Compounds for Nutrition, Health and Disease”. *Molecules*. 19(9): 14879-14901.
- FAO. 2018. “Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal”. [En línea] <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf> [Consulta 14 agosto 2023].
- Figuerola P.M.G., Pérez R.I.F., Paredes L.O., Mondragón J.C., Reynoso C.R. 2018. “Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity”. *International Journal of Food Properties*. 21(1): 1728-1742.
- González O.Y.J. 2002. “Contenido de fibra cruda y fibra dietética en mezclas de cereal-leguminosa sometidas a germinación y tratamiento térmico”. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Guevara F. T., Jiménez I. H., Reyes E.M. L., Mortensen A. G., Laursen B. B., Lin, L.W., De la Rosa A.P.B. 2010. “Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia spp.*)”. *Journal of Food Composition and Analysis*. 23(6): 525-532.
- Gutiérrez R.A.M., Arriola G.E., Jacques F.G.E., Morales H.N., Corona G.R.I., Guatemala M.G.M. 2017. “Caracterización fisicoquímica de un alimento extruido tipo botana”.

Memorias del XXXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. 9 al 12 de Mayo de 2017, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México.

- Hernández-Castillo J.B.E., Bernardino-Nicanor A., Juárez-Goiz J.M.S., González-Cruz L. 2016. “Determinación de los Cambios Originados por los Procesos de Asado y Freído del Nopal Verdura (*Opuntia ficus-indica*) sobre la Concentración de Carotenoides, Fenoles Totales y la Actividad Antioxidante”. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 1(1): 526-531.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024].
- Kamiloglu S., Toydemir G., Boyacioglu D., Beekwilder J., Hall R. D., Capanoglu E. 2016. “A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 56(sup1): S110-S129.
- Karam M.C., Petit J., Zimmer D., Djantou E.B., Scher J. 2016. “Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review”. *Journal of Food Engineering*. (88): 32-49.
- Littell, R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures. *Journal of Animal Science*. 76: 1216- 1231.
- Loor-Mendoza N.E. 2016. “Fundamentos de los alimentos peletizados en la nutrición animal”. *Dominio de las Ciencias*. 592: 323-333.
- Manzanarez-Tenorio L.E., Ruiz-Cruz S., Cira-Chávez L.A., Estrada-Alvarado M.I., Márquez-Ríos E., Toro-Sánchez C.L., Suárez-Jiménez G.M. 2022. “Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (*Opuntia gosseliniana*) en dos etapas de coloración”. *Biotechnia*. 168: 101-106.
- Márquez J.V., Ciro H.J., Rojano B.A. 2003. “Efecto de un proceso de deshidratación con aire forzado en la composición química y nutricional de la mora de castilla (*Rubus glaucus*)”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 1886: 1865-1876.
- Martínez-Soto G., Celis-Fabián F., Hernández-Pérez T., Paredes-López O. 2015. “Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.)”. *International Journal of Food and Nutritional Science*, 168-173.
- Moncada-Rodríguez L. M., Gualdrón de Hernández L. 2006. “Retención de nutrientes en la cocción, freído y horneado de tres alimentos energéticos”. *Revista de Investigación*, 179–187.
- Moreno C., Andrade M. J., Oña G., Llumiquinga T., Concellón A. 2015. “Efecto de la Cocción sobre la Composición Química y Capacidad Antioxidante de Papas Nativas del Ecuador”. *Revista Científica Ecuatoriana*. 35: 20–26.
- Navarro-Valdez K., Capillo-Herrera N., Calixto-Cotos M.R., Santisteban-Rojas O. P. 2020. “Extracción y microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de *Oenocarpus bataua mart*”. *Scientia Agropecuaria*. 639: 547-554.

- Ordaz-Ochoa G., Juárez-Caratachea A., Portillo-Martínez L., Pérez-Sánchez R.E., Ortiz-Rodríguez R. 2019. “Evaluación productiva y análisis costo-beneficio de cerdas alimentadas con una dieta adicionada con nopal (*Opuntia ficus-indica*) durante la lactancia”. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 1076: 1027-1041.
- Ortiz-Rodríguez R., Ahumada-Garcini J.T., Pérez-Sánchez E.R., García-Saucedo P.A., Martínez-Flores H.E., Val-Arreola D. 2022. “Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 138: 242-253.
- Pérez-Servín I. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Pérez-Sánchez R.E., Delgado-Sánchez L.A., García-Saucedo P.A. Pulido J. Ortiz-Rodríguez R. 2015. “Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias”. *Nova Scientia*: 133-152.
- Martínez-Flores H.E., Gárnica-Romo M.G., Zavala-Mendoza E. 2021. “Georreferenciación y caracterización de cinco especies silvestres de *Opuntia* localizadas en Michoacán, México”. Portillo, L., Viguera A., Soltero R., Romo, C.R.L., *Opuntia. Aportaciones a su conocimiento y aprovechamiento*. México. Orgánica Editores, 2021, 8-22.
- Mironeasa S., Cotovanu I., Mironeasa C., Ungureanu-Iuga M. 2023. “A review of the changes produced by extrusión cooking on the bioactive compounds from vegetal sources”. *Antioxidants*. 12(7): 1453.
- Quishpi-Guachalá J.F. 2021. “Utilización del nopal en la industria alimentaria para la elaboración de alimentos funcionales”. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- Ramírez E., Córdoba D., Sánchez M., Díez C., Goñi I. 2013. “Effect of boiling on nutritional, antioxidant and physicochemical characteristics in cladodes (*Opuntia ficus-indica*), *LWT- Food Science and Technology*. 560: 296-302.
- Reid T., Munyanyi M., Mduluzi T. 2016. “Effect of cooking and preservation on nutritional and phytochemical composition of the mushroom *Amanita zambiana*”. *Food Science & Nutrition*. 833: 538–544.
- SADER. 2020. “El nopal es un producto endémico de México en donde, además, se ha diversificado: de las 200 especies de nopales, 101 viven en nuestro país”, <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano> [Consulta 13 de agosto de 2023].
- SIAP. 2023. “¡Y el nopal ingreso en la dieta simbólica y real de los mexicanos! Cifras y datos sobre esta ancestral planta”. <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos#:~:text=Su%20producci%C3%B3n%20en%20el%20a%C3%B1o,conseguir%2070.5%20toneladas%20por%20hect%C3%A1rea> [Consulta 13 de agosto de 2023].

Tesis de Maestría: “Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre citocinas proinflamatorias, integridad intestinal, metabolitos energéticos y productividad”

- Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. 1999. “Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods Enzymology*. 299: 152–178.
- Suárez-Hernández P., Rodríguez-Rodríguez. E.M., Díaz-Romero C. 2004. “Cambios en el valor nutritivo de patatas durante distintos tratamientos culinarios”. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 291: 257-261.
- Taga M.S., Miller E.E., Pratt D.E. 1984. “Chia seeds as a source of natural lipid antioxidants”. *Journal of American Oil Chemists Society*. 61: 928-931.

CAPÍTULO II

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES POSTDESTETE (PRIMERA SEMANA) SOBRE CITOCINAS PROINFLAMATORIAS Y SU RELACIÓN CON VARIABLES PRODUCTIVAS

Resumen

El objetivo fue determinar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus indica*) extrusado a la dieta de lechones en la primera semana postdestete sobre citocinas proinflamatorias y su relación con variables productivas. Se utilizaron 17 lechones destetados (21 ± 2 días y 7.2 ± 0.8 kg) seleccionados al azar; con 15 lechones se conformaron tres grupos: ($n= 5$ lechones grupo⁻¹). Grupo testigo (GT), Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE). Los tres grupos recibieron alimento® específico para la fase de iniciación. Al alimento® del GNBF y GNE se le adicionó 1.0% y 0.01% de nopal en base fresca (BF) y en extrusado, respectivamente. El porcentaje de nopal en BF y extrusado fue con base al peso lechón⁻¹. Los dos lechones restantes (GND), no fueron destetados, se tomaron como referencia para la evaluación de las citocinas proinflamatorias. Se obtuvieron muestras de sangre de dos lechones grupo⁻¹: GND en los días 21, 23 y 28; GNBF y GNE en los días 0, 3 y 7 postdestete. Se evaluó: citocinas proinflamatorias (IL-1 β , IL-12 y TNF- α), consumo de alimento comercial (CA), peso (P), ganancia de peso (GP) e índice de conversión alimenticia (ICA). La información se analizó a través de mediciones repetidas y las diferencias entre grupos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha=0.05$. Se encontró que el GNBF mostró la menor ($p<0.05$) concentración de IL-1 β , IL-12 y TNF- α al tercer y séptimo día: 113.56 ± 5.46 , 120.49 ± 2.68 y 89.66 ± 2.98 pg/mL para IL-1 β , IL-12 y TNF- α , respectivamente. El GNE obtuvo el mejor ($p<0.05$) comportamiento para las variables CA (2.53 ± 0.12 kg), P (8.97 ± 0.35 kg) y GP (1.98 ± 0.22 kg). Para el ICA, no se observaron diferencias ($p>0.05$) entre grupos: 1.5:1-2.8:1. La adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en la primera semana postdestete disminuye las concentraciones plasmáticas de citocinas proinflamatorias y aumenta el consumo de alimento®.

Palabras clave: Cactus, Antioxidante, Antiinflamatorio, Flavonoides.

Introducción

El proceso de destete en los lechones provoca un estado de estrés para estos y, por ello, se denomina estrés postdestete (Choudhury *et al.*, 2021), mismo que se produce por una serie de cambios para el lechón, tales como: cambio de alojamiento y alimentación, interacción con lechones de otras camadas. Ante estos cambios ocurren una serie de eventos simultáneos a nivel gastrointestinal (Tang *et al.*, 2022): el manejo durante el destete (separación de la camada de su madre) implica que los lechones ayunen y esto, a su vez, provoca que los contenidos gástricos pasen a intestino y afecten al epitelio; aspecto que, produce una respuesta inflamatoria a nivel intestinal (Van *et al.*, 2023).

La activación de los mastocitos y otras células inflamatorias en el intestino producen mediadores de la inflamación como citocinas proinflamatorias, tales como: factor de necrosis tumoral α (TNF- α), interleucina 1 β (IL-1 β), interleucina 12 (IL-12) (Groot *et al.*, 2021); además de producir, mayor cantidad de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Degroote *et al.*, 2020). Todas estas sustancias provocan daños al epitelio intestinal y provocan un aumento de la permeabilidad endotelial, que culminan en atrofia de vellosidades, alteración en la secreción de líquidos y con ello, la disminución del área de absorción (Ilchmann-Diounou y Menard, 2020; Gierynska *et al.*, 2022) y, en consecuencia, el crecimiento del lechón se afectará (Tang *et al.*, 2022).

Así, ante los efectos del estrés postdestete, se han investigado alternativas que mitiguen los daños del epitelio intestinal de los lechones en la etapa temprana de la fase destete-iniciación, como lo es la adición de alimentos nutraceuticos (Das *et al.*, 2020). Al respecto, el nopal (*Opuntia ficus-indica*) puede ser una estrategia viable para disminuir dichos efectos, puesto que esta cactácea posee compuestos fenólicos y flavonoides con efectos antiinflamatorios (Shoukat *et al.*, 2023) y antioxidantes (Zeghibib *et al.*, 2022). Pero, dichos efectos, no se han estudiado en cerdos; únicamente se ha estudiado el efecto hipoglucemiante e hipocolesterolémico en cerdos (Gaitán-Lemus *et al.*, 2018; Ordaz *et al.*, 2020) sometidos a dietas adicionales con esta cactácea en base fresca (BF).

Es un hecho que el nopal en BF tiene beneficios para la productividad porcina, no obstante, el alto contenido de agua de esta cactácea ocasiona que su vida de anaquel sea corta (Trindade *et al.*, 2023). Por ello, se han buscado estrategias para conservar el nopal sin que se pierdan sus propiedades reportadas en BF (Ordaz *et al.*, 2020; Pérez, 2021; Galvan-Aguilar *et al.*, 2024).

Una de estas estrategias es el proceso de extrusión, proceso que abarca la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo, que trae consigo ventajas de técnicas, costos y calidad (Choton *et al.*, 2020); que, para el caso del procesamiento del nopal, tiene ventaja, puesto que esta cactácea es sensible a temperaturas mayores a 50°C (Pérez, 2021) y la extrusión permite su procesamiento a temperaturas menores. Sin embargo, aún no se han estudiado los efectos del nopal extrusado cuando se adiciona a la dieta de los cerdos. Por ello, el objetivo fue determinar el efecto de la adición de nopal (*O. ficus indica*) extrusado a la dieta de lechones en la primera semana postdestete sobre citocinas proinflamatorias y su relación con variables productivas.

Material y Métodos

La investigación se llevó a cabo en el Sector porcino de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ubicada en el municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,864 msnm y ubicada en las coordenadas 19°47'44"N 101°10'35"O (INEGI, 2017).

Se utilizaron 17 lechones de ambos sexos seleccionados al azar con un peso de 7.2±0.8 kg (15 destetados a 21±2 días de edad y 2 continuaron en fase de lactación los días 21, 23 y 28). El genotipo de estos animales fue de línea genética para magrez de la canal y velocidad de crecimiento, mismos que fueron identificados por medio de muescas.

Con los 15 lechones destetados se conformaron tres grupos (n=5 lechones/grupo; cada lechón representó la unidad experimental): Grupo 1 (GT) o testigo, a cada lechón de este grupo se le proporcionó alimento comercial convencional específico para la etapa de iniciación (Tabla 1); Grupo 2 (GNBF), en este grupo a cada lechón se le ofreció alimento comercial para esta etapa adicionado con 1.0% de nopal en BF (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) y Grupo 3 (GNE), al cual se le proporcionó alimento comercial con la adición de 0.1% de extrusado de nopal (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) (Tabla 1). La fase experimental tuvo una duración de 7 días. Los dos lechones restantes y sin destetar conformaron el grupo no destetado (GND), el cual se tomó como referencia para evaluar únicamente las citocinas proinflamatorias. Por lo que, su alimentación se mantuvo de acuerdo con la dieta en etapa de lactancia (Fase 1; Tabla 1).

Cada lechón/grupo se confinó en jaula individual elevada al piso, la cual contenía: un comedero de aluminio confeccionado especialmente para la alimentación individual (28x16 cm; Largo y Ancho, respectivamente) y un bebedero automático tipo chupón. El alimento comercial suministrado a los lechones y el agua de bebida se ofrecieron *ad libitum*.

Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados.

Composición, %	Fase	Nopal	
	1	BF	Extrusado
Humedad	12	93	12
Proteína cruda	19.5	7.2	6.2
Fibra cruda	3	7.8	14.5
Extracto Etéreo	5	2.4	1.3
Extracto libre de nitrógeno	54.3	62.1	51.2
Cenizas	6	20.5	26.8

El nopal se obtuvo de una parcela ubicada en la comunidad de Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, con coordenadas: 20°25'54" N y 101°43'30" O, a una altura de 1,770 msnm, con temperaturas mínimas de 7°C y máximas de 30°C y una precipitación pluvial media anual de 700 mm (INEGI, 2017). Los cladodios seleccionados fueron de una edad de tres meses.

Para el proceso de extrusión del nopal, primeramente, los cladodios de nopal se cortaron en trozos de 2.0 cm³ para molerse en una licuadora de uso doméstico (Oster- BLST4127) y obtener una pasta del nopal, misma que se distribuyó uniformemente y con un espesor de ≈1.0 cm en bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio (Ekco®). Posteriormente, las charolas con la pasta se colocaron en un horno con ventilación forzada (capacidad para 8.0 kg) a una temperatura de 50°C hasta que la pasta alcanzó 37% de humedad. Humedad requerida para el proceso de extruido.

El proceso de extruido del nopal se desarrolló con un molino® manual específico para dicho proceso; obtenido el extrusado de nopal, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevó al horno de ventilación forzada a 50 °C hasta que el extrusado de nopal alcanzó 12% de humedad (Norma Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018).

El suministro de alimento comercial de los lechones se calculó a través del consumo lechón⁻¹ día⁻¹ de acuerdo con su peso al iniciar la fase experimental y se agregó una cantidad extra para considerar alimentación *ad libitum*. Una vez establecida la cantidad de alimento, esta se fraccionó en tres porciones para suministrar a las 8:30, 11:30 y 18:30 h. En caso de la adición

de nopal en BF al alimento comercial, primero se cosechó los cladodios requeridos día^{-1} grupo⁻¹ (GNBF) e inmediatamente se picaron en trozos de aproximadamente 1.0 cm^2 para poder ser suministrados a los lechones. Para el caso del GNE, este se suministró de acuerdo con el peso del lechón⁻¹. Tanto el nopal en BF como en extrusado fue suministrado diariamente a las 9:30 h.

Las variables analizadas fueron concentración sérica de IL-1 β , concentración sérica de IL-12 y concentración sérica de TNF- α , consumo de alimento comercial (CA), peso (P), ganancia de peso (GP), , índice de conversión alimenticia (ICA).

Para la determinación de la concentración sérica de la citocinas proinflamatorias (IL-1 β , IL-12 y TNF- α) se obtuvieron muestras de sangre ($5.0 \text{ mL lechón}^{-1}$) -previo ayuno de 4 h- de un lechón grupo⁻¹ seleccionado al azar los días 0, 3 y 7 postdestete, para los lechones del GNBF y GNE. Mientras que, para el GND, las muestras se obtuvieron los días 21, 23 y 28 de edad. Las muestras de sangre lechón⁻¹ se obtuvieron de la vena yugular con jeringa de 5.0 mL y aguja de calibre 22G. Inmediatamente después de la toma de muestra, se colocaron en tubos BD Vacutainer® con activador de coagulación y gel separador de suero, y se centrifugaron ($2,000 \text{ rpm}$ durante 10 minutos). El suero obtenido se mantuvo congelado -20°C hasta ser analizado.

Las muestras de suero fueron analizadas en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en Jiutepec, Morelos, México, mismas que se corrieron por triplicado.

El CA (tanto de alimento comercial como de nopal en BF y extrusado) se determinó mediante la resta entre la cantidad de alimento comercial y nopal suministrados día^{-1} menos el rechazo de alimento comercial y nopal día^{-1} . El cálculo del rechazo de alimento día^{-1} se realizó a las 7:30 h, una vez retirado el sobrante de alimento del día anterior. Para ello, primeramente, se separó el nopal del alimento comercial de forma manual y posteriormente se pesó el alimento comercial y el nopal por separado. Las cantidades (kg) de alimento suministrado (alimento comercial y/o nopal en BF) día^{-1} lechón⁻¹ y sobrante se pesaron con una báscula SF-400® con una capacidad de 5.0 kg y precisión de 1.0 g . Para el caso de la determinación del consumo total de alimento (CAT) durante los 7 días de la fase experimental, se sumó el consumo de alimento comercial día^{-1} lechón⁻¹ más el consumo de nopal en BF y/o extrusado ingerido día^{-1} lechón⁻¹.

El P lechón⁻¹ se obtuvo mediante una báscula digital portátil MiniCraneScale® modelo WH-C100 con capacidad de 100 kg. Mientras que, para la determinación de la GP, se utilizó la siguiente ecuación:

$$GP = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Tiempo}}$$

El ICA grupo⁻¹ se estableció mediante la siguiente ecuación:

$$ICA = \frac{CAT}{GPT}$$

Donde:

CAT= Consumo de alimento total [alimento® más nopal (BF o extrusado)]

GPT= Ganancia de peso total (peso lechón⁻¹ al inicio de la fase experimental menos peso del lechón⁻¹ al culminar la fase experimental)

La información recabada se analizó a través de la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello la metodología de los modelo de efectos fijos (Littell *et al.*, 1998). El modelo utilizado para el análisis estadístico de las citocinas proinflamatorias fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + L_i + D_j + L(D)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = IL-1 β , IL-12, TNF- α ;

μ = Promedio general;

L_i = Efecto aleatorio del lechón con el i -ésimo lechón= lechón grupo⁻¹: 1, GT; 2, GNBF; 3, GNE y 4, GND;

D_j = Efecto fijo del día con el j -ésimo día= 0, 3 y 7 días post destete para GNBF y GNE; 21, 23 y 28 de lactación para el GND, tomados como día 0, 3 y 7;

$L(D)_{ij}$ = Efecto fijo de la anidación Lechón(Día) con el i -ésimo lechón y el j -ésimo día;

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma_e^2$).

Para el caso del análisis estadístico de las variables productivas, el modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + L_i + G_j + D_k + D(G)_{jk} + e_{ijkl}$$

Donde:

y_{ijkl} = CA, CNBF, CEN, P, GP, ICA;

μ = Promedio general;

L_i = Efecto aleatorio del lechón con el i -ésimo lechón = lechón grupo⁻¹;

G_j = Efecto fijo del grupo con el j -ésimo grupo = GT, GNBF, GNE y GND;

D_k = Efecto fijo del día con el k -ésimo día = 0, 3 y 7 días post destete para GNBF y GNE; 21, 23 y 28 de lactación para el GND, tomados como día 0, 3 y 7;

$D(G)_{ij}$ = Efecto fijo de la anidación Día(Grupo) con el j -ésimo día y el i -ésimo grupo;

e_{ijkl} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma^2_e$).

Las diferencias entre lechones y grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Resultados

Efecto del nopal BF y Extrusado sobre citocinas proinflamatorias en lechones durante los primeros siete días postdestete

Se encontró efecto de lechón, día y anidación día(grupo) para IL-1 β ($p < 0.001$), IL-12 ($p < .0001$) y TNF- α ($p < .0001$). Para el caso de la IL-1 β (Figura 1), las concentraciones al destete (día cero) o día 21 de lactación para el GND fueron similares ($p > 0.05$) en los cuatro lechones evaluados de acuerdo con el grupo: entre 90 y 94 pg/mL; en día tres postdestete o 23 de lactación para el GND, los resultados mostraron incremento ($p < 0.05$): 152 pg/mL en el GT y 125.4 $\pm$ 5.46 mg/mL en el GNE, ambos promedios diferentes entre sí ($p < 0.05$). El GNBF fue similar (113.5 $\pm$ 5.46 pg/mL) al GNE y al GND ($p > 0.05$) y menores ($p < 0.05$) respecto al GT. Para el día 7 postdestete o 28 de lactación para el GND, en el único grupo que disminuyó la concentración séricas de IL-1 β fue el GT (121.53 $\pm$ 5.46 pg/mL), respecto al día 3 postdestete; el resto mantuvo concentraciones promedio similares al día 3 postdestete (Figura 1; A).

Respecto a las concentraciones de IL-12 durante la primera semana postdestete, los resultados en el día cero (día del destete) o 21 de lactación (GND) mostraron que, en los cuatro lechones analizados -de acuerdo con el grupo-, los promedios de las concentraciones séricas fueron similares ($p>0.05$): entre 63 y 66 pg/mL (Figura 1; B). En el tercer día postdestete o 23 de lactación (GND), la concentración mayor ($p<0.05$) fue en el lechón del GT (237.97 ± 2.68 pg/mL) vs resto de los lechones grupo⁻¹ analizados. Sin embargo, el lechón del GNBf mostró menor concentración al del lechón del GNE: 120.49 ± 2.68 y 167.08 ± 2.68 pg/mL, respectivamente. No obstante, el lechón del GND fue en donde se observó el menor valor (99.89 ± 2.68 pg/mL) en el día 23 de lactación $\approx$ 3^{er} día postdestete ($p<0.05$). En el día 7 postdestete, la concentración promedio de IL-12 disminuyó ($p<0.05$) en el lechón del GT (150.14 ± 2.68 pg/mL) respecto al día 3 postdestete; el resto de los lechones grupo⁻¹ mostraron concentraciones séricas similares ($p>0.05$) al del día 3 postdestete (Figura 1; B).

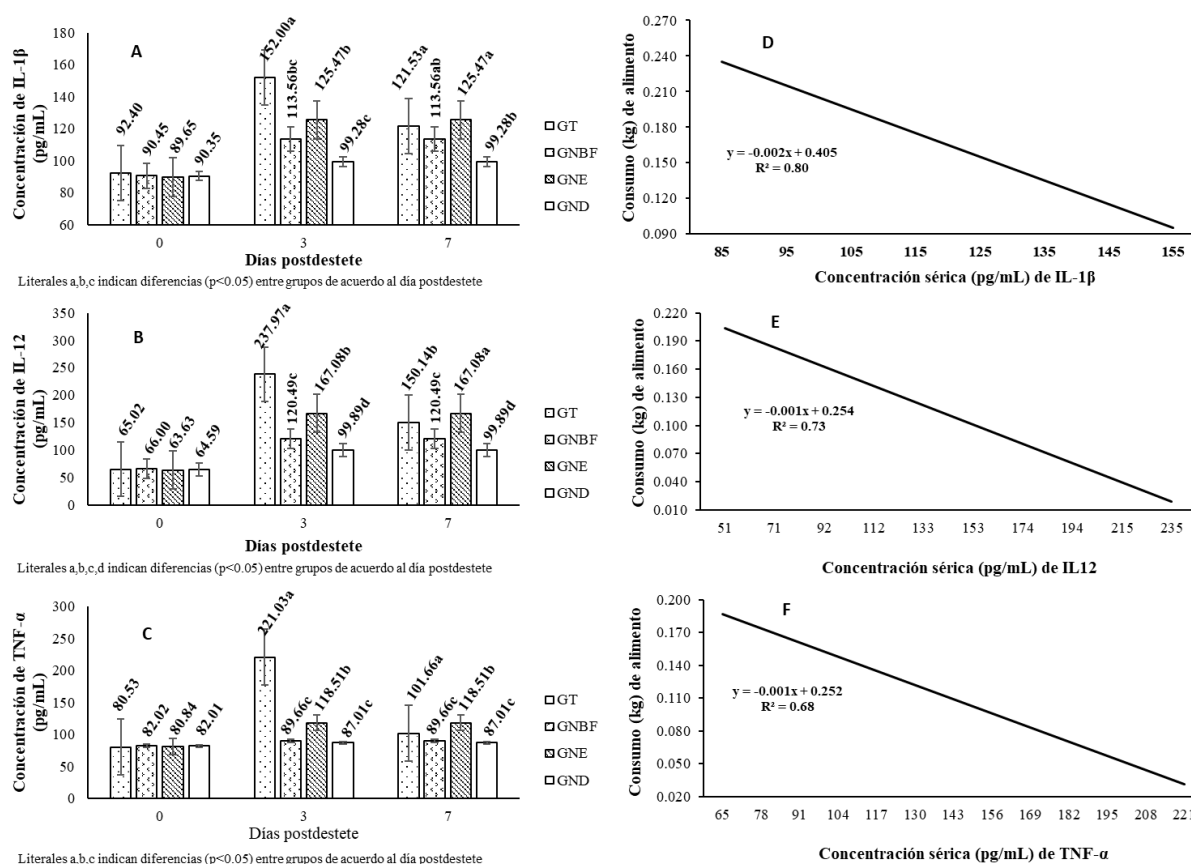


Figura 1. Comportamiento de las concentraciones séricas de las citocina IL-1 β (A), IL-12 (B) y TNF- α (C) de acuerdo con el día del destete y grupo y predicción del comportamiento del consumo de alimento/lechón en el GT de acuerdo con la concentración de IL-1 β (D), IL-12 (E) y TNF- α (F).

En cuanto a los resultados de la concentración sérica de la interleucina TNF- α , se observó en el día del destete (día cero) o 21 días de lactancia (GND) que, los promedios de las concentraciones en los cuatro lechones grupo⁻¹ evaluados fueron similares entre sí ($p>0.05$): entre 80 a 82 pg/mL (Figura 1; C). Al tercer día postdestete o 23 días de lactancia (GND), el GT y GNE fueron los que mostraron incremento con respecto al día cero: 221.03 ± 2.98 y 118.51 ± 2.98 pg/mL, respectivamente; ambos promedios diferentes entre sí ($p<0.05$). El GNBf (89.66 ± 2.98 pg/mL) y GND (87.01 ± 2.98 pg/mL), además de que sus concentraciones fueron similares ($p<0.05$) entre sí, mostraron similitud en las concentraciones respecto al día 3 postdestete (Figura 1; C).

Efecto del nopal BF y Extrusado sobre la productividad de lechones en los primeros siete días postdestete

Se encontró efecto de grupo sobre el peso del lechón ($p= 0.014$) al culminar la primera semana de la fase de iniciación (día 7 postdestete). La ganancia de peso total (día 1 al 7 postdestete) fue de 1.978 kg/lechón en el GNE; ganancia superior ($p<0.05$) al del GT y GNBf: 0.505 y 0.267 kg/lechón, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo

Variable	Grupo			$\pm$ EE	Pr > t
	GT	GNBF	GNE		
Peso Inicial kg	7.172	7.238	6.988	0.23	0.734
Consumo de Alimento®/día kg	0.148 ^b	0.143 ^b	0.361 ^a	0.02	<0.001
Consumo de Nopal*/día kg	--	0.048 ^a	0.006 ^b	0.002	<0.001
Consumo de Alimento® Total kg	1.038 ^b	1.004 ^b	2.532 ^a	0.12	<0.001
Consumo de Nopal* Total kg	--	0.339 ^a	0.045 ^b	0.010	<0.001
Peso Final 1ª Semana kg	7.677 ^b	7.505 ^b	8.966 ^a	0.35	0.014
Ganancia de Peso Total	0.505 ^b	0.267 ^b	1.978 ^a	0.22	<0.001
Ganancia Diaria de Peso kg	0.072 ^b	0.038 ^b	0.282 ^a	0.03	<0.001
Índice de Conversión Alimenticia	2.6	2.8	1.5	0.71	0.367

GT= Grupo Testigo; GNBf= Grupo con nopal base fresca (BF); GNE= Grupo con extrusado de nopal; Prom= Promedio; EE= error estándar; *= BF o Extrusado

Literales ^{a,b} indican diferencias estadísticas ($p<0.05$) entre promedios dentro de fila.

En cuanto a los consumos de alimento comercial y nopal (BF o extrusado), el GNE fue donde se observó el mayor ($p<0.05$) consumo total (día 1 al 7 postdestete): 2.532 kg de alimento/lechón y 0.339 kg de nopal en BF lechón⁻¹ vs 1.038 kg de alimento lechón⁻¹ y 1.004 kg lechón⁻¹ y 0.045 kg de nopal extrusado lechón⁻¹, para el GT y GNBf (Tabla 2). En cuanto al resultado del índice de conversión alimenticia grupo⁻¹, este fue de 2.6, 2.8 y 1.5, para el GT, GNBf y GNE, respectivamente; promedios similares ($p<0.05$) entre sí (Tabla 2).

En cuanto a la asociación (r) entre las concentraciones de las citocinas proinflamatorias, consumo de alimento comercial y variables productivas de los lechones durante la primera semana postdestete, solo se encontró en el GT correlación del consumo de alimento con IL-1 β (r = -0.89; p<0.001), IL-12 (r = -0.86; p<0.001) y TNF- α (r = -0.83; p<0.001); en el GNB y GNE, no se observó correlación entre consumo de alimento y concentración de citocinas proinflamatorias. Sin embargo, en dichos grupos, si se encontró correlación (p<0.05) entre el día y las concentraciones de IL-1 β , IL-12 y TNF- α (Tabla 3).

Tabla 3. Correlaciones de Pearson entre citocinas proinflamatorias y consumo de alimento comercial en lechones destetados y en la primera semana de la fase de iniciación

	GT			GNBF			GNE		
	IL-1 β	CA	IL-12	Día	IL-1 β	IL-12	Día	IL-1 β	IL-12
IL-1 β	1			0.79*	1		0.81*	1	
CA	-0.89**	1		-0.14 ^{NS}	0.27 ^{NS}		-0.10 ^{NS}	-0.08 ^{NS}	
IL-12	0.99**	-0.86**	1	0.83*	0.96**	1	0.82*	0.98**	1
TNF- α	0.91**	-0.83**	0.93**	0.64 ^{NS}	0.65 ^{NS}	0.75*	0.81*	0.95**	0.99**

GT= Grupo testigo; GNB= Grupo nopal en BF; GNE= Grupo nopal extrusado

**= Altamente significativo (p<0.001); *= Significativo (p<0.05); NS= No significativo (p>0.05).

De acuerdo con las asociaciones entre citocinas proinflamatorias y el consumo de alimento comercial de los lechones del GT, los estimadores de la regresión lineal (Tabla 4) determinaron la magnitud del efecto de las tres citocinas evaluadas sobre el consumo de alimento; de manera general, el consumo se disminuye (p<0.05) en 2.0, 1.0 y 1.0 g pg⁻¹ mL⁻¹ que se incrementa IL-1 β (Figura 1; D), IL-12 (Figura 1; E) y TNF- α (Figura 1; F), respectivamente.

Tabla 4. Estimadores de la regresión lineal para el consumo de alimento de lechones del grupo testigo (GT) en la primera semana de la fase de iniciación de acuerdo con el tipo de citocina proinflamatoria

Citocina	Estimadores de la regresión lineal				
IL-1 β	β_0	β_1	EE	Pr > t	R ²
	0.405	-0.002	0.0006	0.028	0.799
IL-12	β_0	β_1	EE	Pr > t	R ²
	0.254	-0.001	0.000	0.003	0.732
TNF- α	β_0	β_1	EE	Pr > t	R ²
	0.252	-0.001	0.000	0.006	0.684

Discusión

Encontrar una estrategia que ayude a disminuir la inflamación y el estrés oxidativo a nivel gastrointestinal ocasionado por el destete en los lechones es suma de importancia, ya que podría mejorar la ganancia de peso y/o la conversión alimenticia (Huting *et al.*, 2021). Al respecto, en

esta investigación se encontró que, la adición a la dieta de lechones destetados de nopal en BF y extrusado mostró disminuir las concentraciones de citocinas proinflamatorias, en donde el mejor comportamiento se observó en el grupo que consumió nopal en BF (Figura 1).

En lo que respecta a las concentraciones de las citocinas, Rymut *et al.* (2021) reportaron valores el día del destete para IL-1 de 680-940 pg/mL, de 620-690 pg/mL para IL-12, y de 390-530 pg/mL para TNF- α , valores que son mayores a los encontrados en este trabajo (Figura 1). Esta diferencia puede radicar en el nivel de estrés que se manejó en cada investigación, es posible que los lechones de esta investigación se estresaron menos y que por esta razón las concentraciones de las citocinas proinflamatorias fueron menores.

Por otro lado, en cuanto al comportamiento de las citocinas conforme transcurrieron los días, se ha establecido que el proceso inflamatorio ocurre durante los primeros días post-destete (Tang *et al.*, 2022). En esta investigación se confirma esto, ya que al tercer día postdestete las concentraciones de las citocinas fueron superiores al día cero y para el séptimo día, disminuyeron para casi volver al promedio inicial (Figura 1). Sin embargo, también es evidente que los grupos con adición de nopal (GNFB y GNE) obtuvieron menores ($p < 0.05$) concentraciones de citocinas que el GT, confirmando el efecto antiinflamatorio del nopal, independientemente de su presentación (BF o extrusado).

Para explicar los efectos mencionados, es necesario tener en cuenta que el proceso inflamatorio en el intestino de los lechones comienza por la activación del cortisol a las células leucocitarias (mastocitos, macrófagos, neutrófilos, entre otras células) en el intestino (Groot *et al.*, 2021). Estas células se encargan de producir sustancias moduladoras de la inflamación, como lo son las citocinas proinflamatorias, en donde se incluyen la IL-1 β , la IL-12 y el TNF- α ; que provocan el reclutamiento de más células leucocitarias (Casulleras *et al.*, 2020). Estas células se encargarán de proteger y destruir lo que está “dañando” al epitelio, sin embargo, esto provocará la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y de radicales libres (RL), es decir, estrés oxidativo (Vona *et al.*, 2021); que a su vez provocarán daño a las células contiguas del intestino y más producción de citocinas para el reclutamiento de células leucocitarias, ocasionando un feedback positivo (Buzoglu *et al.*, 2023).

En relación con los párrafos anteriores, se ha establecido que el nopal posee acción antiinflamatoria y antioxidante (Shoukat *et al.*, 2023), ya que posee una gran cantidad de

compuestos fenólicos y flavonoides, tales como: ácido gálico, narcisina, nicotiflorina, isoquercetina, isorhamnetina-3-O-glucoside, entre muchos otros (Zeghibib *et al.*, 2022). Estos compuestos se encargan de estabilizar los RL y las ROS mediante la donación de electrones. Relacionado a esto, se ha establecido que efectivamente los flavonoides y compuestos fenólicos en general, disminuyen la inflamación intestinal y que ayuda a prevenir y tratar enfermedades gastrointestinales (Safe *et al.*, 2021); lo cual también demuestran Ferjani *et al.* (2024), quienes encontraron una menor concentración de IL-1 β y de TNF- α en ratas con lesiones intestinales inducidas y a las cuales se les suministró extracto acuoso de nopal (*O. ficus-indica*), rico en compuestos fenólicos y flavonoides. Por esta razón, es muy probable la adición de nopal mostró una disminución en cuanto a las concentraciones de las citocinas analizadas para el tercer día postdestete, pues los compuestos fenólicos y flavonoides disminuyeron el estrés oxidativo, deteniendo el feedback positivo mencionado en el párrafo anterior.

A pesar de observar el efecto antiinflamatorio en los dos grupos con nopal (GNBF y GNE), existieron diferencias entre ambos ($p < 0.05$), lo que podría indicar que esta diferencia se debió al proceso de extrusión. Respecto a esto, Galván-Aguilar *et al.* (2024) reportó una tendencia no significativa a disminuir los flavonoides cuando el nopal se somete a proceso de extrusión. Es posible que esta disminución sea la causa de observar un menor efecto antiinflamatorio en el GNE. Además, también es posible que el porcentaje de adición a los lechones (1% en BF y 0.1% en extrusado, respecto al peso del animal) influyera en el efecto observado (Figura 1).

En lo que respecta a la correlación entre la concentración plasmática de citocinas y el consumo de alimento®, se ha encontrado que el incremento de IL-1 β provoca una producción intestinal de colecistoquinina (Dockray, 2014), neurotransmisor anorexogénico, es decir, inhibirá el apetito y/o consumo de alimento (Cawthon y de la Serre, 2021). En el mismo sentido, se ha reportado que altas concentraciones de algunas citocinas proinflamatorias (IL-1 β , TNF- α) a nivel periférico, provoca la producción de las mismas citocinas a nivel cerebral y se activa una serie de señales y eventos neuroendocrinos que culminan en una reducción de la ingesta de alimento (Kuhla, 2020; Brown y Bradford, 2021).

Por último, al relacionar el grado de inflamación (Figura 1) con las variables productivas (Tabla 2), se esperaría un mejor comportamiento en los lechones sometidos a la dieta adicionada con nopal en BF. Sin embargo, no ocurrió así; el grupo que mostró un mejor comportamiento fue el

GNE (Tabla 2). Al respecto, Orengo *et al.* (2021), no encontró efecto de tratamiento sobre las variables productivas cuando adicionaron antioxidantes comerciales a las dietas de lechones destetados para disminuir el nivel de inflamación y estrés oxidativo.

En relación con el consumo de alimento®, este fue mayor ($p < 0.05$) en GNE (Tabla 2). Esto pudiera asociarse al efecto del ayuno (2 horas) establecido para que los lechones del GNE pudieran consumir el total de nopal extrusado ofrecido $\text{día}^{-1} \text{lechón}^{-1}$. Puesto que, este fenómeno se ha observado en la investigación de Serrano *et al.* (2008) quienes encontraron que cerdos con una restricción de alimento y posterior acceso *ad libitum* comieron más (9%), crecieron más (20%) y tuvieron una mejor conversión alimenticia (13%). Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la Tabla 3 y Tabla 4, el consumo de alimento debería ser mejor en el GNBF y similar al GNE. Esto puede explicarse por los demás compuestos y propiedades del nopal en BF.

Se ha establecido que el nopal en BF posee una gran cantidad de fibra soluble (Hernández-Becerra *et al.*, 2022), estos componentes (mucílago y pectinas) son emulsificantes (Shoukat *et al.*, 2023), lo que ocasiona una disminución en el tiempo de vaciado gástrico y sensación de saciedad más prolongada (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021). Sin embargo, esto también trae consigo ventajas a nivel intestinal, tales como: i) mayor tiempo de contacto con las vellosidades intestinales y ii) mayor tiempo de absorción. Lo que explicaría que el ICA fuera similar estadísticamente ($p > 0.05$) en todos los grupos a pesar de la diferencia en el consumo de alimento y peso (Tabla 2).

Desde otro enfoque, se ha establecido que los lechones poseen “neofobia alimentaria”, que provoca la disminución del consumo de alimento con nuevas dietas (Middelkoop *et al.*, 2020), fenómeno que es posible que se presentara, ya que el nopal en BF es un nuevo alimento y puede que haya provocado que los lechones no quisieran acercarse al alimento a comer más cantidad; por lo contrario, el extrusado por ser menor cantidad y similar en textura y tamaño al alimento comercial®, este se mezclaba mejor y los lechones pudieron no notarlo, ocasionando que su consumo fuera mayor que los otros grupos.

Conclusión

La adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en la primera semana postdestete es una estrategia viable para modular los efectos del estrés postdestete; sobre todo, porque a partir del tercer día postdestete las concentraciones plasmáticas de citocinas proinflamatorias se reducen protegiendo con ello al epitelio gastrointestinal. Además, dicha adición a la dieta de estos animales no modifica -de manera negativa- el consumo voluntario de alimento y la ganancia de peso.

Bibliografía

- Brown W.E., Bradford B.J. 2021. “Invited review: Mechanisms of hypophagia during disease”. *Journal of Dairy Science*. 104(9): 9418-9436.
- Buzoglu H.D., Burus A., Bayazit Y., Goldberg M. 2023. “Stem cell and oxidative stress-inflammation cycle”. *Current Stem Cell Research & Therapy*. 18(5): 641-652.
- Casulleras M., Zhang I.W., López-Vicario C., Clària J. 2020. “Leukocytes, systemic inflammation and immunopathology in acute-on-chronic liver failure”. *Cells*. 9(12): 2632.
- Cawthon C.R., De la Serre C.B. 2021. “The critical role of CCK in the regulation of food intake and diet-induced obesity”. *Peptides* 138: 170492.
- Choton S., Gupta N., Bandral J.D., Anjum N., Choudary A. 2020. “Extrusion technology and its application in food processing: A review”. *The Pharma Innovation Journal*. 9(2): 162-168.
- Choudhury R., Middelkoop A., Boekhorst J., Gerrits W.J.J., Kemp B., Bolhuis J.E., Kleerebezem M. 2021. “Early life feeding accelerates gut microbiome maturation and suppresses acute post-weaning stress in piglets”. *Environmental Microbiology*. 23(11): 7201-7213.
- Coutiño-Laguna B.C., Cruz-Requena M., Palomo-Ligas L., Segura-Almaraz K.L., Chávez-García S.N., Nery-Flores S.D., Rodríguez-Herrera, R. 2021. “*Opuntia* Fiber and Its Health-Related Beneficial Properties”. At *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*, 299-330.
- Das G., Lim KJ., Tantengco OAG., Carga HM., Goncalves S., Romano A., Kumar DS., Coy-Barrera E., Han-Seung S., Gutiérrez-Grijalva EP., Heredia JB., Kumar PJ. 2020. “Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”. *Phytotherapy Research*. 1-36.
- Degroote J., Vergauwen H., Wang W., Van G.C., De Smet S., Michiels J. 2020. “Changes of the glutathione redox system during the weaning transition in piglets, in relation to small intestinal morphology and barrier function”. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 11(45).
- Dockray G.J. 2014. “Gastrointestinal hormones and the dialogue between gut and brain”. *Journal of Physiology*. 592(14): 2927-2941.

- Ferjani W., Kouki A., Dang P.M.C., Fetoui H., Chtourou Y., Ghanem-Boughanmi N., Ben-Attia M., El-Benna J., Souli A. 2024. “*Opuntia ficus-indica* cladodes extract inhibits human neutrophil pro-inflammatory functions and protects rats from acetic acid-induced ulcerative colitis”. *Inflammopharmacology*. 32: 3825-3844.
- Gaitán-Lemus S.B., Ordaz-Ochoa G., Val-Arreola D., Martínez-Flores H.E., Ortiz-Rodríguez, R. 2018. “Diet supplemented with nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifies productive behavior and blood profile in pigs”. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 17(1): 39-50.
- Galvan-Aguilar M., Pérez-Sánchez R.E., Ortiz-Rodríguez R., Luna-Cruz A., Altamirano-Hernández J., Val-Arreola D. 2024. “Comparación de los valores de los compuestos bioactivos (fenoles y flavonoides totales) y actividad antioxidante del nopal (*Opuntia ficus indica*) verdura y forrajero postproceso de extrusión”. IV Foro Internacional Red IINOCA. 23-25 de octubre de 2024. Escobedo, Nuevo León.
- Gierynska M., Szulc-Dabrowska L., Struzik J., Mielcarska M.B., Gregorczyk-Zboroch K.P. 2022. “Integrity of the Intestinal Barrier: The Involvement of Epithelial Cells and Microbiota-A Mutual Relationship”. *Animals*. 12(145).
- Groot N., Fariñas F., Cabrera-Gómez C.G., Pallares F.J., Ramis G. 2021. “Weaning causes a prolonged but transient change in immune gene expression in the intestine of piglets”. *Journal of Animal Science*. 99(4): 1-12.
- Hernández-Becerra E., Aguilera-Barreiro M.A., Contreras-Padilla M., Pérez-Torrero E., Rodríguez-García M.E. 2022. “Nopal cladodes (*Opuntia ficus-indica*): Nutritional properties and functional potential”. *Journal of Functional Foods*. 95: 105183.
- Huting A.M., Middelkoop A., Guan X., Molist F. 2021. “Using nutritional strategies to shape the gastro-intestinal tracts of suckling and weaned piglets”. *Animals*. 11(2): 402.
- Ilchmann-Diounou H. y Menard S. “Psychological stress, intestinal barrier dysfunctions and autoimmune disorders: an overview”. *Frontiers in Immunology*. 11(1).
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico del Estado de Guanajuato. [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092146.pdf [Consulta septiembre 2024]
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024].
- Kuhla B. 2020. “Review: Pro-inflammatory cytokines and hypothalamic inflammation: implications for insufficient feed intake of transition dairy cows”. *Animal*. 14: 65-77.
- Littell R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. “Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures”. *Journal of Animal Science*. 76(1):1216- 1231.
- Middelkoop A., Kemp B., Bolhuis E. 2020. “Early feeding experiences of piglets and their impact on novel environment behavior and food neophobia”. *Applied Animal Behavior Science*. 232: 105142.

- Ordaz G., Juárez A., López M., Martínez H.E., Pérez R.E., Ortiz R. 2020. “*Opuntia ficus-indica* as a supplement for gilts in late gestation and lactation: effects on biochemical parameters and voluntary feed intake”. *Journal of Applied Animal Research*. 49(1): 404-412.
- Orengo J., Hernández F. Martínez-Miró S., Sánchez C.J., Peres R.C., Madrid J. 2021. “Effects of commercial antioxidants in feed on growth performance and oxidative stress status of weaned piglets”. *Animals*. 11(2): 266.
- Pérez SI. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”. Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Rymut H.E., Rund L.A., Bolt C.R., Villamil M.B., Southey B.R., Johnson R.W., Rodríguez-Zas S.L. 2021. “The combined effect of weaning stress and immune activation during pig gestation on serum cytokine and analyte concentrations”. *Animals*. 11: 2274.
- Safe S., Jayaraman A., Chapkin R.S., Howard M., Mohankumar K., Shrestha R. 2021. “Flavonoids: structure-function and mechanisms of action and opportunities for drug development”. *Toxicological Research*. 37(2): 147-162.
- Serrano M.P., Valencia D.G., Lázaro R., González-Mateos G. 2008. “La restricción alimenticia como herramienta para cumplir con la norma para cerdos Ibéricos”. https://www.3tres3.com/es-mx/articulos/la-restriccion-alimenticia-como-herramienta-para-cumplir-con-la-norma_1397/ [Consulta 15 diciembre 2024].
- Shoukat R., Cappai M., Pia G., Pilia L. 2023 “An updated review: *Opuntia ficus-indica* (OFI) chemistry and its diverse applications”. *Applied Sciences*. 13(13): 7724.
- Tang X., Xiong K., Fang R., Li M. 2022. “Weaning stress and intestinal health of piglets: A review”. *Frontiers in Immunology*. 13(1):1-14.
- Trindade S., Rouxinol M.I., Agulheiro-Santos A.C. 2023. “*Opuntia ficus-indica* L. Fruits Cold Storage Using Different Packaging Materials”. *Sustainability*. 15(14).
- Van K.C., Turpin D., Michiels J., Pluske, J. 2023. “Reducing weaning stress in piglets by pre-weaning socialization and gradual separation from the sow: a review”. *Animals*. 13(10): 1644.
- Vona R., Pallotta L., Cappelletti M., Severi C., Matarrese P. 2021. “The impact of oxidative stress in human pathology: Focus on gastrointestinal disorders”. *Antioxidants*. 10(2): 201.
- Zeghib W., Boudjouan F., Bachir-bey M. 2022. “Optimization of phenolic compounds recovery and antioxidant activity evaluation from *Opuntia ficus indica* using response surface methodology”. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 16: 1354-1366.
- Zeghib W., Boudjouan F., Vasconcelos V., Lopez G. 2022. “Phenolic compounds’ occurrence in *Opuntia* species and their role in the inflammatory process: a review”. *Molecules*. 27(15): 4763.

CAPÍTULO III

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES DESTETADOS SOBRE INTEGRIDAD DE LAS VELLOSIDADES INTESTINALES Y SU RELACIÓN CON VARIABLES PRODUCTIVAS

Resumen

El objetivo fue determinar el efecto de la adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación (FI) sobre la integridad de las vellosidades intestinales (VI) y su relación con las variables productivas. Se utilizaron 30 lechones de ambos sexos (destetados a 21 ± 2 días de edad y con 7.2 ± 0.8 kg) seleccionados al azar, con los cuales se formaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹). Grupo testigo (GT), Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE). Los tres grupos recibieron alimento® específico para la FI. Al alimento® del GNBF se le adicionó 1.0% de nopal en base fresca (BF), en el GNE, al alimento® se le adicionó 0.1% de extrusado de nopal. El porcentaje de nopal en BF y extrusado fue con base al peso semana⁻¹ lechón⁻¹. La fase experimental duró 14 días; al culminar esta, se seleccionaron tres lechones al azar (lechón grupo⁻¹), de los cuales se tomaron muestras (10 cm) de cada porción del intestino delgado para su análisis histológico. Se evaluó lechón⁻¹ grupo⁻¹: consumo (C) de alimento®, consumo Total de alimento® (CTA), peso del lechón, ganancia diaria de peso (GDP), índice de conversión alimenticia (ICA), largo y ancho de las VI, profundidad de criptas (PCrip), relación Vellosidad:cripta (R-VI:Crip) y área de absorción (Abs). La información se analizó mediante un modelo de efectos fijos y las diferencias entre grupos se obtuvo a través de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha < 0.05$. En duodeno, el largo ($627.3 \mu\text{m}$), ancho ($233.9 \mu\text{m}$) y PCrip ($784.2 \mu\text{m}$) fueron mayores ($p < 0.05$) en GNBF vs GNE y GT; en yeyuno, solo el ancho ($136.4 \mu\text{m}$) y PCrip ($543.5 \mu\text{m}$) fueron mayores ($p < 0.05$) en GNBF; en el íleon, el largo (476.2), ancho (153.9), PCrip (338.9) y R-VI:Crip (1.4) también fueron mayores en GNBF vs GNE y GT. Al culminar la fase experimental, el peso ($12.955 \text{ kg lechón}^{-1}$), la GDP ($426 \text{ g lechón}^{-1}$) y el CTA ($3.377 \text{ kg lechón}^{-1}$) mostraron un mejor ($p < 0.05$) comportamiento en el GNE vs GNBF y GT. La adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en los primeros 14 días postdestete no muestra beneficios en la integridad intestinal; pero, mejora la ganancia diaria de peso en comparación con los lechones que se someten a una dieta adicionada con nopal BF.

Palabras clave: Destete, Estrés, Nutraceutico, Histología.

Introducción

En la producción porcina, el destete (separación de la madre y sus lechones) y los cambios que experimentan los lechones, tales como: el traslado del área de maternidad al área de iniciación, la interacción con lechones de otras camadas y la alimentación únicamente sólida, provocan estrés en estos animales (Van *et al.*, 2023); el cual, se puede reflejar en inflamación intestinal generalizada y menor desempeño productivo de estos animales (Zheng *et al.*, 2021). Puesto que, el proceso inflamatorio en el intestino del lechón recién destetado provoca alteraciones que afectan la integridad del epitelio intestinal; debido a que, a mayor pérdida de células epiteliales menor velocidad con la que se regenera dicho tejido (Hageman *et al.*, 2020).

Así, el proceso inflamatorio en el intestino del lechón recién destetado ocasiona: i) menor área de absorción intestinal, ii) modificación de la permeabilidad endotelial del intestino (Gierynska *et al.*, 2022), iii) alteración de la secreción de líquidos (Ilchmann-Diounou y Menard, 2020) y iv) diarreas mecánicas (Tang *et al.*, 2024). Aspectos que en su conjunto explicarían el bajo desempeño productivo de estos animales en la etapa temprana de la fase de iniciación; por lo que se deben utilizar medidas preventivas (Monger *et al.*, 2021; Canibe *et al.*, 2022).

Dentro las medidas preventivas, para contrarrestar los efectos del estrés del lechón destetado, se encuentra el uso de alimentos con actividad nutracéutica (Das *et al.*, 2020). En este sentido, el nopal (*Opuntia ficus-indica*) cumple con esta función y puede utilizarse como insumo en la dieta de estos cerdos (Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2021). Puesto que esta cactácea, posee actividad antiinflamatoria, antioxidante y prebiótica (Elshehy *et al.*, 2020). Gaitán-Lemus *et al.* (2018) reportó que la adieta adicionada con nopal (*O. ficus-indica*) en base fresca (BF) provocó en cerdos en engorda (30-100 kg) mayor longitud y altura de las vellosidades intestinales; así como, menor consumo de alimento.

El nopal también se ha utilizado como parte de la dieta de cerdas gestantes y en fase de lactación, con efectos positivos en la productividad de estos animales (Ordaz *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha establecido que tanto la mano de obra para el picado y suministro del nopal a los cerdos y la corta vida de anaquel de esta cactácea no hacen viable su uso a gran escala (Ortiz *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2023). Por lo que, se han buscado alternativas y procesos que permitan conservar el nopal por más tiempo y en donde sus propiedades no se vean afectadas (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2022).

Una de las alternativas para conservar el nopal es la extrusión, proceso que abarca la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo; proceso que, además, trae consigo ventajas tanto técnicas como de costos y calidad (Choton *et al.*, 2020). Además, la extrusión requiere de temperaturas menores a 50°C -temperaturas mayores a 50°C provocan pérdidas de componentes del nopal (Pérez, 2021)-. La desventaja de este proceso es la pérdida de fibra cruda, minerales (cenizas) y fenoles totales. Pero, mejora los contenidos de proteína cruda, extracto libre de nitrógeno, flavonoides totales y actividad antioxidante (DPPH) (Capítulo I). Sin embargo, aún no se han estudiado los efectos del nopal extrusado cuando se adiciona a la dieta de los cerdos. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación sobre la integridad de las vellosidades intestinales y su relación con las variables productivas.

Material y Métodos

La investigación se llevó a cabo en el Sector porcino de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ubicada en el municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,864 msnm y ubicada en las coordenadas 19°47'44"N 101°10'35"O (INEGI, 2017).

Se utilizaron 30 lechones destetados (21 ± 2 días de edad) de ambos sexos seleccionados al azar, con un peso de 7.2 ± 0.8 kg. El genotipo de estos animales fue de línea genética para magrez de la canal y velocidad de crecimiento. Con el total de animales se conformaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹; 6 hembras y 4 machos grupo⁻¹; cada lechón considerado como una repetición): Grupo testigo (GT); Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE), en los tres grupos a cada lechón grupo⁻¹ se les proporcionó alimento comercial convencional específico para la etapa (Tabla 1); la diferencia fue que en GNBF, el alimento suministrado a cada lechón se le adicionó 1.0% de nopal en BF y en el GNE, el alimento suministrado a cada lechón se le adicionó 0.1% de nopal extrusado; el porcentaje de nopal en BF o extrusado fue con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón; en el GNE, se requirió de ayuno de 2 horas día⁻¹ lechón⁻¹ para asegurar el consumo total del extrusado de nopal suministrado día⁻¹; consumido el total de extrusado ofrecido se les suministro la cantidad correspondiente (día⁻¹ lechón⁻¹) de alimento®.

Cada lechón grupo⁻¹ se confinó en jaula individual elevada al piso, la cual contenía: un comedero de aluminio confeccionado especialmente para la alimentación individual (28x16 cm; Largo y Ancho, respectivamente) y un bebedero automático tipo chupón. El alimento convencional suministrado a los grupos y el agua de bebida se ofrecieron *ad libitum*. La fase experimental tuvo una duración de 14 días.

Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados.

Composición, %	Fase			Nopal	
	1	2	3	BF	Extrusado
Humedad	12	12	12	93	12
Proteína cruda	19.5	19	19	7.2	6.2
Fibra cruda	3	3.4	3.6	7.8	14.5
Extracto Etéreo	5	5	4.5	2.4	1.3
Extracto libre de nitrógeno	54.3	54.6	55.4	62.1	51.2
Cenizas	6	6	5.5	20.5	26.8

Para el caso del suministro total del alimento convencional día⁻¹ lechón⁻¹, primeramente, se calculó el consumo lechón⁻¹ día⁻¹ de acuerdo con su peso semanal y se agregó una cantidad extra para considerar alimentación *ad libitum*. Una vez establecida la cantidad de alimento, esta se fraccionó en tres porciones para suministrar a las 8:30, 11:30 y 18:30 h. Mientras que la adición de nopal (BF y extrusado) a la dieta se realizó diariamente a las 9:30 h.

El nopal se obtuvo de una parcela ubicada en la comunidad de Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, con coordenadas: 20°25'54" N y 101°43'30" O, a una altura de 1,770 msnm, con temperaturas mínimas de 7°C y máximas de 30°C y una precipitación pluvial media anual de 700 mm (INEGI, 2017). Los cladodios seleccionados fueron de una edad de tres meses.

En caso de la adición de nopal en BF, una vez cosechados estos fueron picados en trozos de aproximadamente 1.0 cm² para poder ser suministrados a los cerdos. Para el proceso de extrusión del nopal, primeramente, los cladodios se cortaron en trozos de 2.0 cm³ para molerse en una licuadora de uso doméstico (Oster- BLST4127) y obtener una pasta del nopal, misma que se distribuyó uniformemente y con un espesor de ≈1.0 cm en bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio (Ekco®). Posteriormente, las charolas con la pasta se colocaron en un horno con ventilación forzada (capacidad para 8.0 kg) a una temperatura de 50°C hasta que la pasta alcanzó 37% de humedad; porcentaje de humedad requerido para el proceso de extruido.

El proceso de extruido del nopal se desarrolló con un molino® manual específico para dicho proceso; obtenido el extrusado de nopal, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevó al horno de ventilación forzada a 50 °C hasta que el extrusado de nopal alcanzó 12% de humedad (Norma Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Al culminar la fase experimental, se seleccionaron al azar tres lechones (un lechón grupo⁻¹), mismos que fueron eutanasiados de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM) para el sacrificio humanitario de los animales domésticos (NOM-033-ZOO-1995). Inmediatamente después de la eutanasia, se disecó el intestino delgado y se obtuvieron muestras del duodeno, yeyuno e íleon (10 cm/porción intestinal) para su análisis histológico.

Se evaluó lechón⁻¹ grupo⁻¹: consumo de alimento® (CA), consumo de nopal en BF (CNBF) y extrusado de nopal (CEN), consumo total de alimento (alimento® más nopal BF o extrusado) total (CTA), peso del lechón, ganancia diaria de peso (GDP), índice de conversión alimenticia (ICA), largo y ancho de las VI, profundidad de criptas (PCrip), relación Vellosidad:Cripta (R-VI:Crip) y área de absorción (Abs).

El CA, CNBF y CNE (día⁻¹ lechón⁻¹) se determinaron mediante la resta entre la cantidad de alimento® y nopal (BF y extrusado) suministrados día⁻¹ menos el rechazo día⁻¹ de alimento® y nopal (BF y extrusado); dicho cálculo se realizó diariamente a las 7:30 h. Primeramente, se separó el nopal del alimento® de forma manual y posteriormente se pesó el alimento® y el nopal (BF y extrusado) por separado. Las cantidades (kg) de alimento suministrado (alimento® y/o nopal en BF o extrusado) día⁻¹ cerdo⁻¹ y el alimento sobrante se pesaron en una báscula SF-400® con una capacidad de 5 kg y precisión de 1 g.

El CTA, se estableció sumando el CA día⁻¹ lechón⁻¹ más el CNBF día⁻¹ lechón⁻¹ o CEN día⁻¹ lechón⁻¹ durante la fase experimental.

El peso lechón⁻¹ se obtuvo mediante una báscula digital portátil MiniCraneScale® modelo WH-C100 con capacidad de 100 kg.

La GDP se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$GDP = \frac{\text{Peso final lechón}^{-1} \text{ semana}^{-1} - \text{Peso inicial lechón}^{-1} \text{ semana}^{-1}}{7 \text{ días}}$$

El ICA se determinó mediante la siguiente formula:

$$ICA = \frac{CTA}{GPT}$$

Donde:

CTA = Consumo de alimento total [alimento® más nopal (BF o extrusado)]

GPT = Ganancia de peso total (peso lechón⁻¹ al inicio de la fase experimental menos peso del lechón⁻¹ al culminar la fase experimental)

Para determinar el largo y ancho de las VI porción⁻¹, muestra⁻¹ porción⁻¹ del intestino delgado (duodeno, yeyuno e íleon) se depositó en un frasco estéril rotulado con la identificación del animal y la porción del intestino correspondiente. Posteriormente, cada porción intestinal se enjuagó cuidadosamente con solución salina y se fijó mediante inmersión en una solución de formalina buferada al 10%. La fijación e induración fue de 48 h. Posteriormente, se realizó la deshidratación, aclaramiento e inclusión en bloques de parafina; para ello, se utilizó un procesador de tejidos o Histokinette Microm® y para la infiltración e inclusión (bloque) de parafina se utilizó el Ecoshel®. Obtenidos los bloques de parafina, se procedió con los cortes histológicos con un microtomo de avance Microm® a un espesor de 7 µm corte⁻¹. Cada corte histológico se transfirió a un portaobjetos y se tiñó con hematoxilina y eosina para su observación y evaluación histológica.

Las estructuras de las VI se determinaron utilizando un microscopio Leica DM750P con objetivo de 4x y el largo y ancho de las VI; así como, la P-Crip se obtuvieron mediante un analizador de imágenes Leica Application Suite V4® (LAS V4®). La R-VI:Crip se determinó dividiendo la altura de la vellosidad entre la P-Crip. Mientras que, para determinar el Abs se multiplicó la altura por el ancho de la VI.

La información recabada a través del tiempo (día⁻¹ lechón⁻¹) se analizó a través de la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello un modelo de efectos fijos (Littell *et al.*, 1998):

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + S_j + S(G)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = CA, CNBF, CEN, peso del lechón, GDP e ICA;

μ = Promedio general;

G_i = Efecto fijo del grupo con el i -ésimo grupo= GT, GNBF y GNE;

S_j = Efecto fijo de la semana con la j -ésima semana= 1 y 2;

$S(G)_{ij}$ = Efecto fijo de la anidación Semana(Grupo) con la j -ésima semana y el i -ésimo grupo;

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma^2_e$).

Para el caso de las variables medidas en una sola ocasión, estas se analizaron mediante la metodología de los modelos lineales generalizados (Littell *et al.*, 2002) bajo el siguiente modelo:

$$y_{ijk} = \mu + P(G)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = CTA, VI (Largo y Ancho), P-Crip, R-VI:Crip y Abs;

μ = Promedio general

$P(G)_{ij}$ = Efecto fijo de la anidación Porción(Grupo) con la i -ésima porción= Duodeno, Yeyuno, Íleon y el j -ésimo grupo= GT, GNBF y GNE;

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma^2_e$).

Las diferencias entre grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Resultados

Integridad intestinal: vellosidades intestinales (VI), profundidad de criptas (Pcrip) y relación vellosidad intestinal:profundidad de cripta (R-VI:Crip)

Se encontró efecto ($p < 0.0001$) de la anidación Porción(Grupo) sobre las variables referentes a las porciones del intestino delgado. En el Duodeno, el largo y ancho de las VI en el GNBF fue donde se observó mayor ($p < 0.05$) promedio para el largo ($627.3 \pm 4.6 \mu\text{m}$) y el ancho (233.9

$\pm 3.3 \mu\text{m}$) de las VI; ello, en comparación con GT y GNE. En el caso de la Pcrip, los tres grupos analizados presentaron promedio diferentes entre sí ($p < 0.05$); el GNBF mostró mayor Pcrip ($p < 0.05$) $784.2 \pm 4.6 \mu\text{m}$. Para el caso de la R-VI:Crip, los promedios de los grupos analizados fueron diferentes entre sí ($p < 0.05$); en el GT donde se observó una mayor R-VI:Crip (1.0 ± 0.02) (Tabla 2).

Tabla 2. Medias de mínimos cuadrados para largo y ancho de vellosidades y profundidad de criptas de acuerdo con la porción intestinal y el grupo.

Duodeno	GT	GNBF	GNE	$\pm\text{EE}$	Pr > t
Largo (μm)	424.9 ^b	627.3 ^a	376.9 ^c	4.6	<.0001
Ancho (μm)	174.4 ^b	233.9 ^a	183.0 ^b	3.3	<.0001
Prof. Criptas (μm)	431.6 ^c	784.2 ^a	521.6 ^b	4.6	<.0001
Relación V:C	1.0 ^a	0.8 ^b	0.7 ^c	0.02	<.0001
Yeyuno	GT	GNBF	GNE	$\pm\text{EE}$	
Largo (μm)	371.1 ^a	333.4 ^b	301.5 ^c	4.6	<.0001
Ancho (μm)	126.4 ^b	136.4 ^a	129.0 ^b	3.3	<.0001
Prof. Criptas (μm)	255.1 ^c	543.5 ^a	308.7 ^b	4.6	<.0001
Relación V:C	1.5 ^a	0.6 ^c	1.0 ^b	0.02	<.0001
Íleon	GT	GNBF	GNE	$\pm\text{EE}$	
Largo (μm)	266.7 ^b	476.2 ^a	257.1 ^b	4.6	<.0001
Ancho (μm)	139.9 ^b	153.9 ^a	142.5 ^{ab}	3.3	<.0001
Prof. Criptas (μm)	342.4 ^a	338.9 ^a	302.6 ^b	4.6	<.0001
Relación V:C	0.8 ^c	1.4 ^a	0.9 ^b	0.02	<.0001

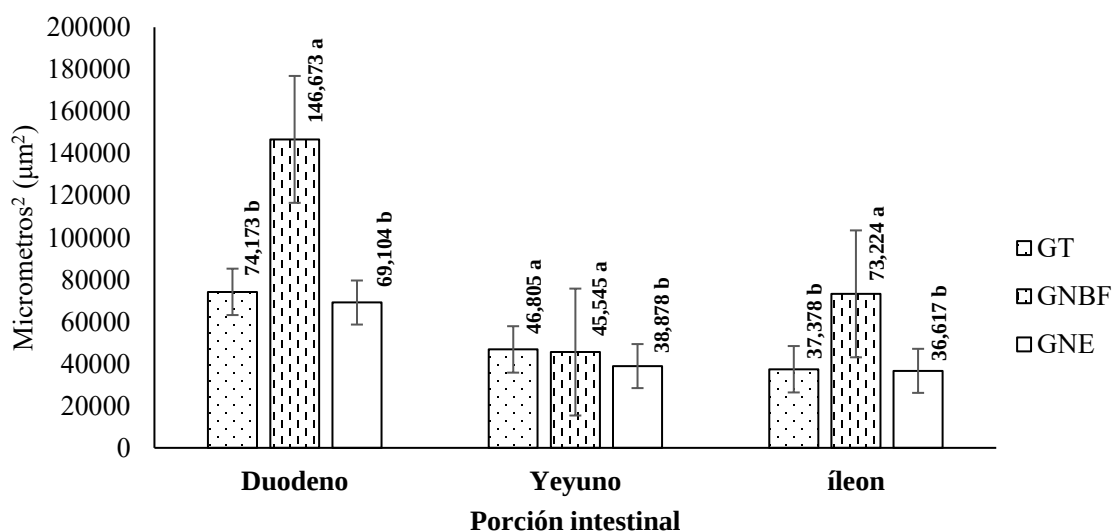
Literales ^{a, b} indican diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre filas. GT: Grupo Testigo; GNBF: Grupo con nopal en BF; GNE: Grupo con extrusado de nopal.

Con relación a la porción del Yeyuno (Tabla 2), los valores promedio del largo de las VI fueron diferentes ($p < 0.05$) en los tres grupos analizados: el GT mostró un largo mayor ($p < 0.05$) ($371.1 \pm 4.6 \mu\text{m}$), mientras que en el GNE se observó el menor largo de la VI ($301.5 \pm 4.6 \mu\text{m}$) ($p < 0.05$). Para el caso del ancho de la VI, este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNBF ($136.4 \pm 3.3 \mu\text{m}$) respecto al GT y GNE; mismos que presentaron promedios similares entre sí ($p > 0.05$). En cuanto a la Pcrip, se observó una mayor profundidad ($p < 0.05$) en el Yeyuno del GNBF ($543.5 \pm 4.6 \mu\text{m}$) vs GT y GNE. La R-VI:Crip, en dicha porción intestinal, fue diferente en los tres grupos analizados ($p < 0.05$); presentando un mejor ($p < 0.05$) comportamiento el GT (1.5 ± 0.02) en comparación con el GNBF y GNE (Tabla 3).

En la porción del Íleon (Tabla 2) se observó que, el largo de las VI fueron similares en el GT y GNE ($p > 0.05$); pero, menores ($p < 0.05$) al promedio del GNBF ($476.2 \pm 4.6 \mu\text{m}$). En cuanto al

ancho de las VI, en esta porción intestinal, los promedios del GT ($139.9 \pm 3.3 \mu\text{m}$) y GNBf ($153.9 \pm 3.3 \mu\text{m}$) fueron diferentes entre sí ($p < 0.05$); pero, ambos grupos presentaron promedios similares ($p > 0.05$) al del GNE ($142.5 \pm 3.3 \mu\text{m}$). En lo que respecta a la Pcrip, el GT ($342.4 \pm 4.6 \mu\text{m}$) y GNBf ($338.9 \pm 4.6 \mu\text{m}$) presentaron promedios similares entre sí ($p > 0.05$), pero mayores ($p < 0.05$) al GNE. Para el caso de la R-VI:Crip, los promedios de los tres grupos analizados fueron diferentes entre sí ($p < 0.05$) y en donde el GNBf fue quien mostró mayor ($p < 0.05$) promedio (1.4 ± 0.02) vs GT y GNE (Tabla 2).

Finalmente, los resultados del Abs (Figura 1) determinaron que, el GNBf mostró una mayor Abs ($p < 0.05$) en Duodeno ($146,673 \mu\text{m}^2$) e Íleon ($73,224 \mu\text{m}^2$) respecto al GT y GNE. En el Yeyuno, el Abs fue similar ($p > 0.05$) en el GT ($46,805 \mu\text{m}^2$) y GNBf ($45,545 \mu\text{m}^2$); pero, mayor ($p < 0.05$) al GNE. En cuanto al Íleon, el Abs fue mayor ($p < 0.05$) en el GNBf ($73,224 \mu\text{m}^2$).



Literales ^{a,b} indican diferencias ($p < 0.05$) entre grupos por porción intestinal
 GT= Grupo testigo; GNBf= Grupo nopal en BF; GNE= Grupo extrusado de nopal

Figura 1. Media de mínimos cuadrados para área de absorción respecto al grupo y porción intestinal.

Variables productivas: peso, consumo de alimento®, consumo de nopal (BF y extrusado), ganancia de peso e índice de conversión alimenticia

No se encontró efecto del grupo sobre el peso del lechón al momento del destete ($p = 0.7938$). Pero, si se encontró efecto de grupo sobre el peso del lechón al 7^{mo} ($p = 0.0138$) y 14^{vo} día

postdestete ($p=0.0002$). Para el caso del peso del lechón al 7^{mo} día postdestete, este fue mayor ($p<0.05$) en el GNE (8.966 kg lechón⁻¹) vs GT y GNBF; resultado similar se observó en el 14^{vo} día postdestete: mayor peso en el GNE (12.955 kg lechón⁻¹) vs GT y GNBF (Tabla 3).

Tabla 3. Medias de mínimos cuadrados para variables productivas de los lechones en la etapa 1 a 14 días postdestete de acuerdo con el grupo.

Variable	Grupo			±EE	Pr > t
	GT	GNBF	GNE		
Peso inicial (kg)	7.122	7.222	6.988	0.242	0.7938
Peso 7 ^{mo} día PD (kg)	7.672 ^b	7.466 ^b	8.966 ^a	0.358	0.0138
Peso 14 ^{vo} día PD (kg)	10.477 ^b	10.133 ^b	12.955 ^a	0.439	0.0002
Consumo de Alimento® día ⁻¹ (kg)	0.289 ^b	0.257 ^b	0.482 ^a	0.04	0.0003
Consumo Total de Alimento® (kg)	2.022 ^b	1.799 ^b	3.377 ^a	0.33	0.0004
Consumo de Nopal BF o Extrusado día ⁻¹ (kg)	--	0.053 ^a	0.007 ^b	0.002	<.0001
Consumo Total Nopal BF o Extrusado (kg)	--	0.372 ^a	0.052 ^b	0.054	<.0001
Ganancia de peso día ⁻¹ (kg)	0.243 ^a	0.211 ^a	0.426 ^b	0.05	0.0028
Ganancia de peso Total Etapa (kg)	3.355 ^b	2.911 ^b	5.966 ^a	0.51	<.0001
Índice de conversión alimenticia	1.8:1	1.6:1	1.3:1	0.28	0.4501

EE= Error estándar; GT= Grupo testigo; GNBF= Grupo nopal en base fresca (BF); GNE= Grupo nopal extrusado; PD= Postdestete.

Literales ^{a, b} indican diferencias ($p<0.05$) entre promedios dentro de fila.

En cuanto al efecto de grupo sobre los consumos de alimento (alimento®, nopal en BF y nopal extrusado), se encontró que todas las variables relacionadas con el consumo fueron afectadas por el grupo ($p<0.0001$) y en donde el GNE presentó el mejor comportamiento ($p<0.05$) vs el GT y GNBF. El consumo total de alimento® en los 14 días de la fase experimental fue de 3.377 kg lechón⁻¹; el consumo de alimento® día⁻¹ lechón⁻¹ fue de 482 g. Para el caso del consumo promedio día⁻¹ lechón⁻¹ de nopal en BF, este fue de 53 g vs 7 g de consumo de nopal extrusado (Tabla 3).

Para el caso de la ganancia de peso e índice de conversión alimenticia, en la etapa temprana de la fase de iniciación (14 días postdestete), se encontró efecto de grupo ($p<0.002$) sobre la ganancia de peso (día⁻¹ lechón⁻¹ y Total lechón⁻¹); pero, el grupo no afectó ($p=0.4501$) al índice de conversión alimenticia. En cuanto a la ganancia diaria de peso y ganancia de peso total, los lechones del GNE fueron los que mejor se comportaron (426 g día⁻¹ lechón⁻¹ y 5.966 kg lechón⁻¹) vs GT y GNBF. En cuanto al índice de conversión alimenticia, esta fue de entre 1.3:1 (GNE) a 1.8:1 (GT) (Tabla 3).

Discusión

Para evitar el detrimento del desarrollo de los lechones en las primeras semanas postdestete, se requiere disminuir los efectos del estrés del lechón en esta etapa para garantizar la integridad y correcto funcionamiento del tracto gastrointestinal (Tang *et al.*, 2022). Al respecto, en esta investigación, la adición de nopal en BF a la dieta de lechones (GNBF) en la etapa temprana de fase de iniciación (14 días postdestete) mostró mejorar la morfometría de las vellosidades intestinales de los lechones (Tabla 2); por el contrario, la adición del extrusado de nopal (GNE) a la dieta de los lechones postdestete no mostró mejoría en las variables analizadas (Tabla 2).

La mejoría de la morfometría de las vellosidades intestinales observada en la presente investigación concuerda con lo observado por Gaitán-Lemus *et al.* (2018), en la que se adicionó nopal en BF a cerdos en crecimiento (20-100 kg) y quienes mostraron mayor longitud (altura) de vellosidades respecto al grupo testigo; dicha investigación atribuyó los mejores valores a la fibra soluble del nopal (pectinas, mucílago), ya que esta se considera como prebiótico (Cruz-Rubio *et al.*, 2021) y, por lo tanto, ayuda a mantener la integridad intestinal (Liu *et al.*, 2022).

En cuanto a la morfometría de las vellosidades intestinales, Sittiya *et al.* (2019) y Tejeda y Kim (2020) encontraron en pollos, mayor ($p<0.05$) altura de vellosidades en duodeno e íleon al adicionar diferentes tipos de fibra en comparación con el grupo testigo. Dichas investigaciones, sugieren que los alimentos no convencionales con altos contenidos de fibra ayudan a mantener la integridad de las vellosidades intestinales, aspecto que concuerda con los resultados del GNBF, pero no con lo observado en el GNE (Tabla 2).

Para el caso de Pcrip, Hedemann *et al.* (2002) reportan valores entre 240 y 284 μm en todo el intestino delgado en lechones de nueve días postdestete; valores estos, menores a los observados en esta investigación (Tabla 2). Barros *et al.* (2021), determinan que a mayor profundidad de criptas mayor producción de mucina y, mayor barrera física contra patógenos en el lumen intestinal. Sin embargo, para analizar los efectos de la dieta o tratamiento el análisis debe realizarse a través de la R-VI:Crip (Nguyen *et al.*, 2021). En este sentido, se ha observado una mejoría en dicha relación cuando se añaden diferentes tipos de aditivos a la dieta (Tejeda y Kim, 2021; Prudyus, 2023). Sin embargo, en las porciones intestinales analizadas en esta investigación únicamente en la porción del íleon del GNBF fue donde se observó el mayor promedio de dicha relación (Tabla 2).

Para Nguyen *et al.* (2021), si la profundidad de las criptas es más pequeña que el largo de la vellosidad, la R-VI:Crip se considera como buena; puesto que indica la no existencia de hiperplasia de las criptas de Lieberkühn. Por lo que, a mayor valor de la R-VI:Crip, mayor integridad y salud intestinal. Por el contrario, una menor R-VI:Crip indica hiperplasia de las criptas y, por lo tanto: existe un estado de recuperación de la cantidad de células de la vellosidad que normalmente la conforman (Baht *et al.*, 2020), menor maduración celular y menor capacidad de digestión y absorción (Draskovic *et al.*, 2020).

De acuerdo con Baht *et al.* (2020) y Draskovic *et al.* (2020), la R-VI:Crip en la porción del duodeno de los grupos analizados puede catalogarse como “mala” (menor capacidad de digestión y absorción); en el yeyuno, solo el GT logró catalogar dicha relación como “buena”; mientras que, en íleon, el GNBF presentó un R-VI:Crip considerada como “buena” (Tabla 2). En este sentido, se pueden sugerir que en el íleon (por su cercanía al colon y sus productos de la fermentación de la fibra) la propiedad prebiótica del nopal en BF ayudo a mejorar la integridad del epitelio intestinal del GNBF (Wang *et al.*, 2019; Coutiño-Laguna *et al.*, 2021), específicamente en la porción del íleon (Tabla 2). Aspecto que concuerda con los resultados del Abs (Figura 1), puesto que esta está ligada a la altura de las vellosidades intestinales (Kai, 2021).

La mayor ($p < 0.05$) Abs en duodeno e íleon del GNBF (Tabla 2) pudo deberse al efecto gastro-protector del mucílago (Chowdhury *et al.*, 2017) y/o a los efectos de los compuestos bioactivos del nopal (Cruz-Rubio *et al.*, 2021). Puesto que, la fibra soluble del nopal puede actuar sobre el tracto gastrointestinal (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021) como sustrato para la microbiota intestinal y esta, al fermentarla (en el colon) genera butirato, propionato y acetato (Wang *et al.*, 2019) que son utilizados como fuentes nutritivas para el desarrollo y función de las células del intestino (Tanes *et al.*, 2021). Además, el mucílago puede fungir como protector de la mucosa gástrica (Prajapati y Apte, 2021).

Se ha establecido que el mucilago del nopal recubre la mucosa y disminuye la presencia de úlceras gástricas y duodenales (Andrade y Tribuzy, 2023) al cubrir -como otra capa de moco- el epitelio del intestino; acción que no permite el contacto entre este y sustancias, moléculas y/o microorganismos que puedan dañarlo (Chowdhury *et al.*, 2017). En este sentido, es probable que las vellosidades intestinales de las porciones analizadas del GNBF fueron protegidas por el

mucilago presente en el nopal en BF y, por ello, mostraron un mejor comportamiento (Figura 1).

En cuanto a la escasa respuesta del extrusado de nopal (GNE) a nivel gastrointestinal (Figura 1), esta pudo deberse a varios factores:

Primero, la cantidad de nopal extrusado consumido (Tabla 3) pudo ser causa de los resultados similares ($p>0.05$) a los del GT, en lo que se refiere a las estructuras del intestino analizadas (Tabla 2, Figura 1). Sin embargo, la cantidad de nopal suministrada en materia seca al GNBF fue similar al suministro de nopal extrusado, si se considera que la presentación en BF corresponde al 0.1% en materia seca.

Segundo, el mucilago del nopal extrusado al estar deshidratado no permitió la acción de recubrimiento del epitelio intestinal. Sin embargo, Robin *et al.* (2012), estableció que se modifican los componentes de ciertos cereales al someterlos a extrusión, tales como la fibra tal como se reportó en el Capítulo I, de esta investigación. Pero, Gao *et al.*, (2020) y Wenderlein *et al.* (2022), sugieren que los cambios moleculares en la estructura de la fibra de esta cactácea reducen sus efectos en el sistema gastrointestinal.

Tercero, es posible que se disminuyeran los metabolitos secundarios (flavonoides y fenoles) y su acción antioxidante del nopal durante el proceso de extrusión. En estudios preliminares (sin publicar) no se encontró efecto ($p>0.05$) sobre dichos metabolitos en el nopal extrusado; es decir, los valores de fenoles, flavonoides y actividad antioxidante fue similar ($p<0.05$) entre el nopal extrusado y el nopal en BF. Sin embargo, en esta investigación, específicamente a lo que concierne el Capítulo I se observó lo contrario: en el proceso de extrusión del nopal en BF se pierde fibra cruda, minerales (cenizas) y fenoles totales, pero se mejoran los contenidos de proteína cruda, extracto libre de nitrógeno, flavonoides totales y actividad antioxidante (DPPH), ello de acuerdo con los contenidos en el nopal en BF.

Cuarto, si se relaciona los resultados observados en las estructuras del intestino delgado (Tabla 2, Figura 1) con las variables productivas (Tabla 3), se esperaría un mejor comportamiento en los lechones sometidos a la dieta adicionada con nopal en BF. Sin embargo, no ocurrió así; el grupo que mostró un mejor comportamiento fue el GNE (Tabla 3). Si se compara a este grupo con el GNBF y GT, se puede observar que el peso al 14^{vo} día postdestete fue 21.8 y 19.4% menor

al GNE, respectivamente; pero, consumieron 46.7 y 40.1% menos alimento® que los lechones del GNE, respectivamente y, culminaron, los tres grupos, con un índice de conversión alimenticia similar ($p>0.05$) (Tabla 3).

Se ha establecido que la fibra soluble del nopal disminuye el tiempo de vaciado gástrico, lo cual, provoca una sensación de saciedad por más tiempo (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021). Los componentes principales de la fibra soluble del nopal (mucílago y pectinas) son emulsificantes (Shoukat *et al.*, 2023) y, posiblemente, la emulsificación del bolo alimenticio de los lechones del GNE provocó: i) un desplazamiento más lento por el sistema gastrointestinal, ii) mayor tiempo de contacto con las vellosidades intestinales y iii) mayor tiempo de absorción.

Los porcentajes de pesos menores (21.8%) y los de consumo de alimento® (46.7%) de los lechones del GNE vs GNE -al culminar la etapa temprana de fase de iniciación (primeros 14 días postdestete)- pudiera asociarse al efecto del ayuno (2 horas) establecido para que los lechones del GNE pudieran consumir el total de nopal extrusado ofrecido día⁻¹ lechón⁻¹. Puesto que, este fenómeno se ha observado en la investigación de Serrano *et al.* (2008) quienes encontraron que cerdos con una restricción de alimento y posterior acceso *ad libitum* comieron más (9%), crecieron más (20%) y tuvieron una mejor conversión alimenticia (13%).

Conclusión

La adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en los primeros 14 días postdestete de la fase de iniciación no muestra beneficios en cuanto a la integridad intestinal de los lechones; pero, mejora la ganancia diaria de peso. Sin embargo, en esta investigación, los resultados y su discusión sugieren que se debe realizar modificaciones en el porcentaje de adición de nopal extrusado a la dieta para mejorar la modulación de los efectos del estrés postdestete sobre las vellosidades intestinales de estos animales en etapa temprana de la fase de iniciación.

Bibliografía

- Andrade V.E. y Tribuzy M.C.A. 2023. “Bioprospecting and potential of cactus mucilages: A bibliometric review”. *Food Chemistry*. 401(1).
- Barros B.O.J., Ramos R.B., Corredor M.J.R. Pulecio S.S.L., Gómez G.D., Ochoa A.J. 2021. “Association between productive parameters and intestinal histomorphological findings in broilers supplemented with probiotics (*Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus acidophilus* and *Bacillus subtilis*)”. *International Journal of Morphology*. 39(5):1493-1501.

- Bath V.S., Cohen S.M., Gordon E.B., Wood C.E., Cullen J.M., Harris M.A., Proctor D.M., Thompson C.M. 2020. “An adverse outcome pathway for small intestinal tumors in mice involving chronic cytotoxicity and regenerative hyperplasia: a case study with hexavalent chromium, captan, and folpet”. *Critical Reviews in Toxicology*.
- Canibe N., Hojberg O., Kongsted H., Vodolazska D., Lauridsen C., Skau N.T., Schonhertz A.A. 2022. “Review on Preventive Measures to Reduce Post-Weaning Diarrhea in Piglets”. *Animals*. 12(19).
- Choton S., Gupta N., Bandral J.D., Anjum N., Choudary A. 2020. “Extrusion technology and its application in food processing: A review”. *The Pharma Innovation Journal*. 9(2): 162-168.
- Chowdry M., Sengupta A., Datta L., Chatterjee S. 2017. “Role of mucilage as pharmaceutical additives and cytoprotective agent”. *Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences*. 4(2):46-52.
- Coutiño-Laguna B.C., Cruz-Requena M., Palomo-Ligas L., Segura-Almaraz K.L., Chávez-García S.N., Nery-Flores S.D., Rodríguez-Herrera, R. 2021. “*Opuntia* Fiber and Its Health-Related Beneficial Properties”. At *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*, 299-330.
- Cruz-Rubio J.M., Mueller M., Loeppert R., Viernstein H., Praznik W. 2020. “The effect of cladode drying techniques of the prebiotic potential and molecular characteristics of the mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*”. *Scientia Pharmaceutica*. 88(2).
- Das G., Lim KJ., Tantengco OAG., Carga HM., Goncalves S., Romano A., Kumar DS., Coy-Barrera E., Han-Seung S., Gutiérrez-Grijalva EP., Heredia JB., Kumar PJ. 2020. “Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”. *Phytotherapy Research*. 1-36.
- Dražković V., Stanimirović Z., Glišić M., Bošnjak-Neumuller J., Teodorović R., Teodorović V., Kukolj V. 2020. “The effects of a phytogenic additive on the histomorphometric characteristics of the intestines in weaned pigs with a subclinical natural infection with *Lawsonia intracellularis*”. *Acta Veterinaria-Beograd*. 70(1):81-91.
- Elshehy H., Salah S., Abdel-Mawla E., Agamy N. 2020. “Protective Effect of *Opuntia ficus-indica* against Diabetes in Alloxan-induced Diabetic Rats”. *Canadian Journal of Clinical Nutrition*. 8(2): 20-34.
- Gao X., Yu B., Yu J., Mao X., Huang Z., Luo Y., Luo J., Zheng P., He J., Chen D. 2020. “Influences of dietary starch structure on intestinal morphology, barrier functions, and epithelium apoptosis in weaned pigs”. *Food and Function*. 11(1): 4446-4455.
- Gaitán-Lemus S.B., Ordaz-Ochoa G., Val-Arreola D., Martínez-Flores H.E., Ortiz-Rodríguez, R. 2018. “Diet supplemented with nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifies productive behavior and blood profile in pigs”. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 17(1): 39-50.

- Gierynska M., Szulc-Dabrowska L., Struzik J., Mielcarska M.B., Gregorczyk-Zboroch K.P. 2022. “Integrity of the Intestinal Barrier: The Involvement of Epithelial Cells and Microbiota-A Mutual Relationship”. *Animals*. 12(145).
- Hageman J.H., Heinz M.C., Kretzschmar K., Vaart J., Clevers H., Snippert H.J.G. 2020. “Intestinal Regeneration: Regulation by the Microenvironment”. *Developmental Cell*. 54(4): 435-446
- Ilchmann-Diounou H. y Menard S. “Psychological stress, intestinal barrier dysfunctions and autoimmune disorders: an overview”. *Frontiers in Immunology*. 11(1).
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico del Estado de Guanajuato. [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092146.pdf [Consulta septiembre 2024]
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024]
- Kai Y. 2021. “Intestinal villus structure contributes to even shedding of epithelial cells”. *Biophysical Journal*. 120(4): 699-710.
- Littell R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. “Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures”. *Journal of Animal Science*. 76(1): 1216- 1231.
- Littell R.C., Stroup W.W., Freund J.R. 2022. SAS® for Linear Models Cary NC: SAS Institute Inc. USA, 4: 191-194.
- Liu J., Luo Y., Kong X., Yu B., Zheng P., Huang Z., Mao X., Yu J., Luo J., Yan H., He J. 2022. “Effects of dietary fiber on growth performance, nutrient digestibility and intestinal health in different pig breeds”. *Animals*. 12(23).
- Martínez G., Diéguez S.N., Decundo J.M., Fernández P., Pérez G.D.S., Romanelli A., Amanto F.A., Santillán J.G., Soraci A.L. 2020. “Efecto del orujo de oliva sobre la salud intestinal en lechones de destete”. *Congreso de la Asociación Argentina de Producción Animal*. Xy. (Supl. 1).
- Monger X.C., Gilbert A.A., Saucier L., Vincent A.T. 2021. “Antibiotic Resistance: From Pig to Meat”. *Antibiotics*. 10(1): 1209.
- Nguyen D., Le N.H., Pham V.V., Parra E., Forti A., Le H.T. 2021. “Relationship between the ratio of villus height: crypt depth and gut bacteria counts as well production parameters in broiler chickens”. *The Journal of Agriculture and Development*. 20(3).
- Norma Oficial Mexicana NOM-033-ZOO-1995, Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres. [En línea] https://www.cuautitlan.unam.mx/descargas/cicuae/normas/Norma033.pdf [Consulta mayo 2024]
- Ordaz G., Juárez A., López M., Martínez H.E., Pérez R.E., Ortiz R. 2020. “*Opuntia ficus-indica* as a supplement for gilts in late gestation and lactation: effects on biochemical

- parameters and voluntary feed intake”. *Journal of Applied Animal Research*. 49(1): 404-412.
- Ortiz-Rodríguez R, Ordaz-Ochoa G, García-Saucedo PA, Pérez-Sánchez RE. 2021. “El nopal (*Opuntia ficus-indica*) como complemento de la dieta de cerdas lactantes sobre los niveles de glucosa sérica y consumo de alimento durante la fase de lactancia”. En: Portillo L., R. Soltero, A. L. Viguera y R. de L. Romo (editores). *Opuntia: aportaciones a su conocimiento y aprovechamiento*. Universidad de Guadalajara, México. Pp. 58-64.
- Ortiz R.R., Ahumada G.J.T., Pérez S.R.E., García-Saucedo P.A., Martínez-Flores H.E., Val A.D. 2022.” Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times”. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24(1): 42-253.
- Osorio-Córdoba J., Pelayo-Zaldívar C., Verde-Calvo J.R., Ponce-Valadez M., Díaz de León-Sánchez F., Bosquez-Molina E., Rodríguez-Huenso M.E. 2011. “Conservación de nopal verdura Milpa Alta (*Opuntia ficus-indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10(1): 93-104.
- Pérez SI. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”. Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Prajapati S.S. y Apte M. 2021. “Gums and Mucilage as multifunctional pharmaceutical agent”. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 13(2):2846.
- Prudyus T. 2023. “Morphological characteristics of the duodenum of piglets fed with various feed additives”. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 14(2):66-272
- Robin F., Schuchmann H.P., Palzer S. 2012. “Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities”. *Trends in Food Science & Technology*. 28(1):23-32.
- Serrano M.P., Valencia D.G., Lázaro R., González-Mateos G. 2008. “La restricción alimenticia como herramienta para cumplir con la norma para cerdos Ibéricos”. [En línea] https://www.3tres3.com/es-mx/articulos/la-restriccion-alimenticia-como-herramienta-para-cumplir-con-la-norma_1397/ [Consulta 15 diciembre 2024].
- Shoukat R., Cappai M., Pia G., Pilia L. 2023 “An updated review: *Opuntia ficus-indica* (OFI) chemistry and its diverse applications”. *Applied Sciences*. 13(1).
- Sittiya J., Yamauchi K., Nimanong W., Thongwittaya N. 2020. “Influence of level of dietary fiber sources on the performance, carcass traits, gastrointestinal tract development, fecal ammonia nitrogen, and intestinal morphology of Broilers”. *Brazilian Journal of Poultry Science*. 22(1):001-008.
- Tanes D., Bittinger K., Gao Y., Friedman E.S., Nessel L., Paladhi U.R., Chau L., Panfen E., Fischbach M.A., Braun J., Xavier R.J., Clish C.B., Li H., Bushman F.D., Lewis J.D., Wu G.D. 2021. “Role of dietary fiber in the recovery of the human gut microbiome and its metabolome”. *Cell Host & Microbiome*. 29(1): 394-407.

- Tang Q., Lan T., Zhou C., Gao J., Wu L., Wei H., Li W., Tang W., Diao H., Xu Y., Peng X., Pang J., Zhao X., Sun Z. 2024. “Nutrition strategies to control post-weaning diarrhea of piglets: From the perspective of feeds”. *Animal Nutrition*. 17(1): 297-311.
- Tang X., Xiong K., Fang R., Li M. 2022. “Weaning stress and intestinal health of piglets: A review”. *Frontiers in Immunology*. 13(1): 1-14.
- Tejeda O.J. y Kim W.K. 2021. “Effects of fiber type, particle size, and inclusion level on the growth performance, digestive organ growth, intestinal morphology, intestinal viscosity, and gene expression of broilers”. *Poultry Science*. 100(10).
- Tejeda O.J. y Kim W.K. 2020. “The effects of cellulose and soybean hulls as sources of dietary fiber on the growth performance, organ growth, gut histomorphology, and nutrient digestibility of broiler chickens”. *Poultry Science*. 99(12): 6828-6836.
- Trindade S., Rouxinol M.I., Agulheiro-Santos A.C. 2023. “*Opuntia ficus-indica* L. Fruits Cold Storage Using Different Packaging Materials”. *Sustainability*. 15(14).
- Van K.C., Turpin D., Michiels J., Pluske, J. 2023. “Reducing weaning stress in piglets by pre-weaning socialization and gradual separation from the sow: a review”. *Animals*, 13(10):1644.
- Wang M., Wichienhot S., He X., Fu X., Huang Q., Zhang B. 2019. “In vitro colonic fermentation of dietary fibers: Fermentation rate, short-chain fatty acid production and changes in microbiota”. *Trends in Food Science & Technology*. 88(1): 1-9.
- Wenderlein J., Kienzle E., Straubinger R.K., Schol H., Ulrich S., Boswald L.F. 2022. “Morphology of starch particles along the passage through the gastrointestinal tract in laboratory mice fed extruded and pelleted diets”. *Animals*. 12(8):952.
- Zheng L., Duarte ME., Sevarolli LA., Sung WK. 2021. “Intestinal health of pigs upon weaning: challenges and nutritional intervention”. *Frontiers in Veterinary Science*. 8: 628258.

CAPÍTULO IV

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES (6-30 KG) SOBRE GLUCOSA, COLESTEROL TOTAL Y TRIGLICÉRIDOS SANGUÍNEOS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD

Resumen

El objetivo fue determinar el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre glucosa, colesterol total y triglicéridos sanguíneos. Se utilizaron 15 lechones destetados (21 ± 2 días y 7.2 ± 0.8 kg) seleccionados al azar con los cuales se conformaron 3 grupos: ($n=5$ lechones grupo⁻¹). Grupo testigo (GT), Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE). Los tres grupos recibieron alimento® específico para la fase de iniciación. Al alimento® del GNBF se le adicionó 1.0% de nopal en base fresca (BF), en el GNE, al alimento® se le adicionó 0.1% de extrusado de nopal. El porcentaje de nopal en BF y extrusado fue con base al peso lechón⁻¹. Se obtuvieron muestras de sangre los días 0, 14, 28 y 42 postdestete. Las variables analizadas fueron: glucosa (GLU), colesterol total (COL), triglicéridos (TG), consumo de alimento comercial (CA), ganancia de peso (GP), peso (P). La información se analizó a través de mediciones repetidas y las diferencias entre grupos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha=0.05$. Se encontró efecto ($p<0.05$) de la anidación grupo(día) únicamente para GLU y CA. El GNBF obtuvo los menores ($p<0.05$) promedios de GLU durante toda la etapa los cuales oscilaron entre 59-73 mg/dL. Las concentraciones de COL estuvieron dentro de 66 y 88 mg/dL para todos los grupos. Respecto a los niveles de TG de los tres grupos fueron de 10 a 20 mg/dL. En cuanto al CA diario, este fue mayor ($p<0.05$) en el GNE (1.282 ± 0.07 kg), respecto al GT y GNBF (0.92-0.94 kg). Por otro lado, la GP diaria fue similar en todos los grupos: 0.67-0.68 kg. Y el P final osciló entre 29.52 y 31.11 kg. La adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación no afecta los niveles de metabolitos sanguíneos (GLU, COL, TG), a diferencia del nopal en BF.

Palabras clave: Cactus, Hipoglucemiante, Fibra, Flavonoides.

Introducción

La nutrición y alimentación de los lechones una vez destetados es de importancia debido al estrés generado por el proceso de destete y sus consecuencias a nivel gastrointestinal (Tang *et*

al., 2022), por ello se han buscado estrategias que cubran dichos aspectos (Monger *et al.*, 2021; Canibe *et al.*, 2022), una de ellas es la adición de nutraceuticos (Das *et al.*, 2020); sin embargo, estos suelen ser alimentos no convencionales en las dietas animales y al adicionar un alimento nuevo es importante estudiar sus efectos en el consumo de alimento y el peso final; así, como también, sus efectos en el metabolismo. En este sentido, la glucosa, colesterol y triglicéridos tienen influencia en todos los sistemas del organismo (Wadstrom *et al.*, 2020), en especial, en fases tempranas del desarrollo y crecimiento de los lechones en donde el metabolismo energético es esencial y puede ser afectado con la ingesta de un nuevo alimento (Song *et al.*, 2021).

Dentro de los alimentos nutraceuticos -utilizados como aditivo a la dieta de cerdos- se encuentra el nopal (*Opuntia spp*) (Ortiz *et al.*, 2022). Esta cactácea endémica de México ha demostrado tener efectos hipoglucemiantes e hipocolesterolémicos (Elshehy *et al.*, 2020). Las propiedades del nopal (*Opuntia ficus-indica*) se han estudiado en cerdas gestantes y lactantes, en las que se ha observado un efecto positivo sobre su metabolismo: disminuyen los niveles tanto de glucosa, como de colesterol y triglicéridos (Ordaz *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2020). Sin embargo, dichas investigaciones han trabajado únicamente con nopal en base fresca (BF), y se ha establecido que una vez que se cosecha, el picado de los cladodios (trozos de 2 o 3 cm²) y la corta vida del nopal no lo hacen viable para usarlo en sistemas con un gran número de animales (Trindade *et al.*, 2023). Por lo cual, se han buscado alternativas y procesos que permitan conservar esta cactácea por más tiempo y en donde, principalmente, sus propiedades no se vean afectadas (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2022).

Una de las alternativas para conservar el nopal es la extrusión, proceso que trae consigo ventajas de técnicas, costos y calidad (Choton *et al.*, 2020), que en el caso del nopal tiene ventaja, puesto que, este cactácea es sensible a temperaturas mayores a 50°C y se alteran sus compuestos fisicoquímicos (Pérez, 2021) y la extrusión permite su procesamiento a temperaturas menores. Sin embargo, aún no se han estudiado los efectos del nopal extrusado cuando se adiciona a la dieta de los cerdos. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la adición de nopal (*O. ficus-indica*) extrusado y fresco a la dieta de lechones en fase de iniciación sobre glucosa, colesterol total y triglicéridos sanguíneos, y su relación con la productividad.

Material y Métodos

La investigación se llevó a cabo en el Sector porcino de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ubicada en el municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O (INEGI, 2017).

Se utilizaron 15 lechones destetados (21 ± 2 días de edad) de ambos sexos seleccionados al azar, con un peso de 7.2 ± 0.8 kg. El genotipo de estos animales fue de línea genética para magrez de la canal y velocidad de crecimiento, mismos que fueron identificados por medio de muescas.

Con los 15 lechones se conformaron tres grupos ($n=5$ lechones grupo⁻¹; lechón⁻¹ considerado como una repetición): Grupo 1 o testigo (GT), a cada lechón de este grupo se le proporcionó alimento comercial convencional específico para la etapa 6 a 25 kg de peso vivo (Tabla 1); Grupo 2 (GNBF), en este grupo a cada lechón se le ofreció alimento convencional para esta etapa adicionado con 1.0% de nopal en BF (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) y Grupo 3 (GNE), al cual se le proporcionó alimento convencional con la adición de 0.1% de extrusado de nopal (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) (Tabla 1). La fase experimental tuvo una duración de 6 semanas.

Tabla 1. Composición nutricional de las dietas y aditivos suministrados.

Composición, %	Fase			Nopal	
	1	2	3	BF	Extrusado
Humedad	12	12	12	93	12
Proteína cruda	19.5	19	19	7.2	6.2
Fibra cruda	3	3.4	3.6	7.8	14.5
Extracto Etéreo	5	5	4.5	2.4	1.3
Extracto libre de nitrógeno	54.3	54.6	55.4	62.1	51.2
Cenizas	6	6	5.5	20.5	26.8

Cada lechón grupo⁻¹ se confinó en jaula individual elevada al piso, la cual contenía: un comedero de aluminio confeccionado especialmente para la alimentación individual (28x16 cm; Largo y Ancho, respectivamente) y un bebedero automático tipo chupón.

El alimento convencional suministrado a los grupos y el agua de bebida se ofrecieron *ad libitum*. Para el caso del suministro total día⁻¹ lechón⁻¹ del alimento convencional, primeramente, se calculó el consumo animal⁻¹ día⁻¹ de acuerdo con su peso semana⁻¹ y se agregó una cantidad

extra para considerar alimentación *ad libitum*. Una vez establecida la cantidad de alimento, esta se fraccionó en tres porciones para suministrar; cada porción se suministró a las 8:30, 11:30 y 18:30 h. Mientras que la adición del 1.0% de *O. ficus-indica* en BF a la dieta de los lechones del GNBF, y la adición de 0.1% de extrusado de nopal, se realizó diariamente a las 9:30 h. Una vez obtenido el peso lechón⁻¹ semana⁻¹ se determinó la cantidad requerida de nopal y/o extrusado semana⁻¹ para adicionarse al alimento.

El nopal se obtuvo de una parcela ubicada en la comunidad de Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, con coordenadas: 20.19694 N y 101.69861 O, a una altura de 2140 msnm, con temperaturas mínimas de 7°C y máximas de 30°C y una precipitación pluvial media de 20 mm (INEGI, 2017). Los cladodios seleccionados fueron de una edad de tres meses.

En caso de la adición en BF, una vez cosechados estos fueron picados en trozos de aproximadamente 1.0 cm² para poder ser suministrados a los cerdos. Mientras que, para el proceso de extrusión, primeramente, los cladodios de nopal se cortaron en trozos de 2.0 cm³ para molerse en una licuadora de uso doméstico (Oster- BLST4127) y obtener una pasta del nopal, misma que se distribuyó uniformemente y con un espesor de ≈ 1.0 cm en bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio (Ekco®). Posteriormente, las charolas con la pasta se colocaron en un horno con ventilación forzada (capacidad para 8.0 kg) a una temperatura de 50°C hasta que la pasta alcanzó 37% de humedad. Humedad requerida para el proceso de extruido.

El proceso de extruido del nopal se desarrolló con un molino® manual específico para dicho proceso; obtenido el extrusado de nopal, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevó al horno de ventilación forzada a 50 °C hasta que el extrusado de nopal alcanzó 12% de humedad (Norma Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018).

El consumo de alimento (CA) (tanto de alimento para FI como de nopal en BF y extrusado) se determinó mediante la resta entre la cantidad de alimento comercial y nopal suministrados día⁻¹ menos el rechazo de alimento comercial y nopal día⁻¹. El cálculo del rechazo de alimento día⁻¹ se realizó a las 7:30 h, una vez retirado el sobrante de alimento del día anterior. Para ello, primeramente, se separó el nopal del alimento comercial de forma manual y posteriormente se pesó el alimento comercial y el nopal por separado. Las cantidades (kg) de alimento suministrado (alimento comercial y/o nopal en BF) día⁻¹ cerdo⁻¹ y sobrante se pesaron con una báscula SF-400® con una capacidad de 5.0 kg y precisión de 1.0 g. Para el caso de la

determinación del consumo total de alimento (CAT), se sumó el consumo de alimento convencional más el nopal en BF y/o extrusado ingerido en la fase experimental.

El peso lechón⁻¹ se obtuvo mediante una báscula digital portátil MiniCraneScale® modelo WH-C100 con capacidad de 100 kg.

El establecimiento de la ganancia de peso (GP) se obtuvo a través de la siguiente ecuación:

$$GP = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Tiempo}}$$

Se obtuvieron muestras de sangre (previo ayuno de 4 h) las semanas 0, 2, 4 y 6 post inicio experimental. Se tomaron 5.0 mL de sangre lechón⁻¹ de la vena yugular con jeringa de 5.0 mL y aguja calibre 22G. Inmediatamente después de la toma de muestra, se colocaron en tubos BD Vacutainer® con activador de coagulación y gel separador de suero y se centrifugaron (2,000 rpm durante 10 minutos). El suero obtenido se mantuvo congelado -20°C hasta ser analizado.

Las variables analizadas fueron consumo de alimento comercial (CA), consumo de alimento total (CAT), ganancia de peso (GP), peso (P), glucosa sanguínea (GLU), colesterol total en sangre (COL) y triglicéridos sanguíneos (TG).

El análisis serológico se realizó mediante técnica enzimática/colorimétrica en un aparato EasyVet KONTROLab®. Los reactivos utilizados fueron: GLUCOSE-LQ (ref. 41010; lot. LIQ308; España) para glucosa sanguínea, CHOLESTEROL-LQ (ref. 41022; lot. LIQ454; España) para colesterol total en sangre y, TRIGLYCERIDES-LQ (ref. 41032; lot. LIQ595; España) para triglicéridos sanguíneos.

La información recabada se analizó a través de correlaciones de Pearson y mediante la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello el modelo de efectos fijos (Littell *et al.*, 1998) bajo los siguientes modelos:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + S_j + G(S)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = GLU, COL, TG, CA, CNBF, CEN, peso del lechón y GDP;

μ = Promedio general;

G_i = Efecto fijo del grupo con el i -ésimo grupo= GT, GNB y GNE;

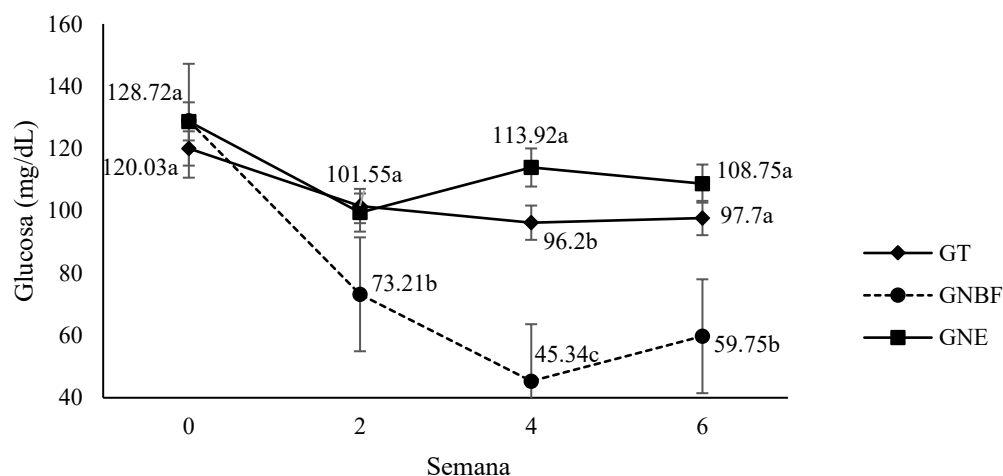
S_j = Efecto fijo de la semana con la j -ésima semana= 0, 2,4,6;

$S(G)_{ij}$ = Efecto fijo de la anidación Grupo(Semana) con la j -ésimo grupo y la i -ésima semana;

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim NID=0, \sigma_e^2$).

Resultados

Se encontró efecto ($p<0.0001$) de la anidación Grupo(Semana) para todos los metabolitos analizados. Para el caso de glucosa sanguínea (GLU), los niveles iniciales (semana cero) fueron similares ($p>0.05$) para todos los grupos, con promedio entre 120-128 mg/dL (Figura 1). Posteriormente, a partir de la segunda semana el GNBf comenzó a disminuir ($p<0.05$) su concentración de GLU alcanzando su promedio más bajo en la cuarta semana (45.34 mg/dL) (Figura 1). Por otro lado, el GT y el GNE mostraron promedios similares ($p>0.05$) toda la fase experimental con promedios entre 97-108 mg/dL, a excepción de la cuarta semana en donde el GNE obtuvo un promedio de GLU mayor ($p<0.05$): 113.92mg/dL; respecto al GT (Figura 1).

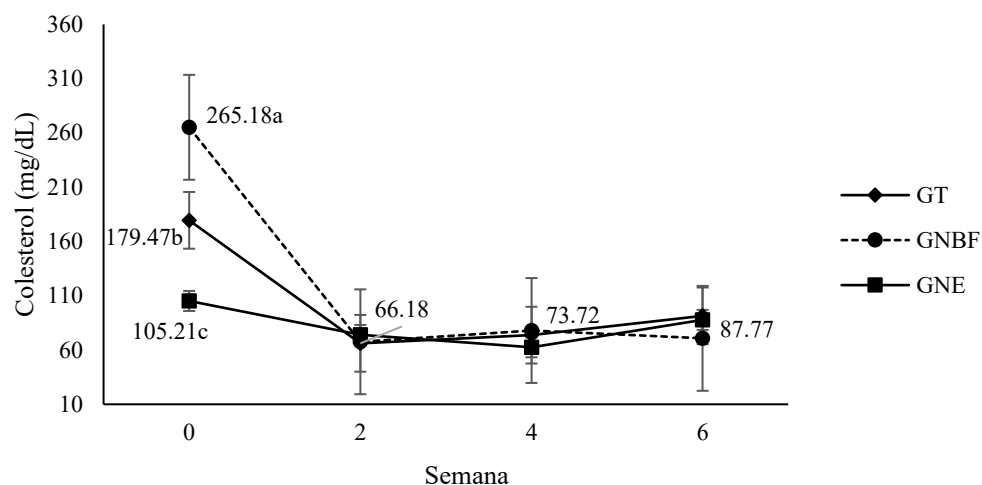


Literales a,b,c indican diferencias ($p<0.05$) entre grupos dentro de día

Figura 1. Medias de mínimos cuadrados para niveles de glucosa sanguínea de acuerdo con el grupo.

En lo que respecta a la concentración de colesterol total en sangre (COL), esta inició con niveles distintos ($p<0.05$) en todos los grupos, con 265.18 mg/dL, 179.47 mg/dL y 105.21 mg/dL para GNBf, GT y GNE, respectivamente (Figura 2). Sin embargo, a partir de la segunda semana de

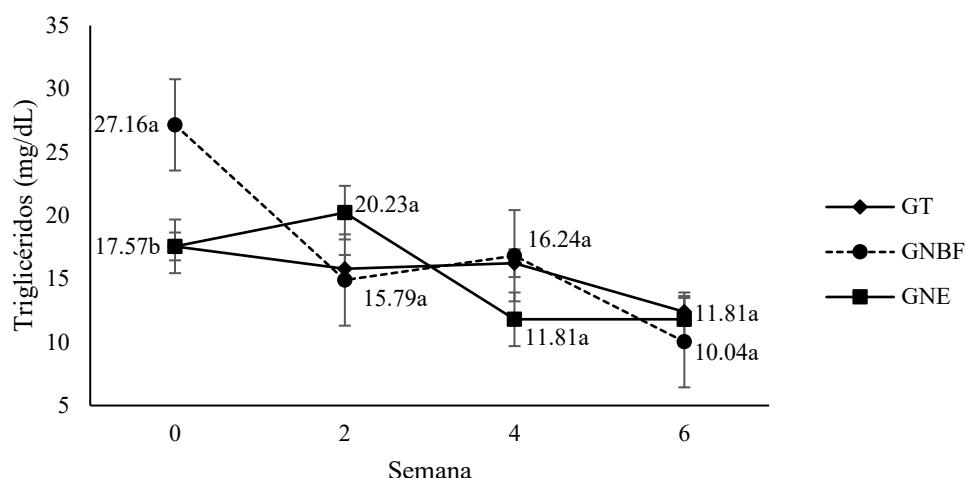
la fase experimental, los niveles de COL disminuyeron y fueron similares ($p>0.05$) en todos los grupos (Figura 2): 66.18 mg/dL en la segunda semana, 73.72 mg/dL en la cuarta semana y 87.77 mg/dL en la sexta semana.



Literales a,b,c indican diferencias estadísticas entre grupos día⁻¹

Figura 2. Medias de mínimos cuadrados para niveles de colesterol sanguíneos de acuerdo con el grupo.

En cuanto a los niveles de triglicéridos en sangre (TG) (Figura 3), el promedio inicial fue distinto ($p<0.05$) entre el GNEF (27.16 mg/dL) vs GT y GNE (17.57 mg/dL). Posteriormente, conforme fue avanzando la fase experimental, las concentraciones de TG fueron disminuyendo en todos los grupos con promedios similares ($p>0.05$); en la semana dos, promedios de 15-20 mg/dL, en la semana cuatro, 11-16 mg/dL y en la sexta semana, 10-11 mg/dL (Figura 3).



Literales a,b indican diferencias estadísticas entre grupos día⁻¹

Figura 3. Medias de mínimos cuadrados para niveles de triglicéridos sanguíneos de acuerdo con el grupo.

Respecto a las variables de consumo de alimento y productivas, no se encontró efecto del grupo sobre el peso del lechón al momento del destete ($p=0.734$), el cual osciló entre 6.9 y 7.2 kg. Al finalizar la etapa, tampoco se encontraron diferencias ($p=0.693$) entre grupos: 29.5-31.1 kg (Tabla 2).

Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo

Variable	Grupo			±EE	Pr > t
	GT	GNBF	GNE		
Peso Inicial kg	7.172	7.238	6.988	0.23	0.734
Consumo de Alimento®/día kg	0.944 ^b	0.929 ^b	1.282 ^a	0.07	<.0001
Consumo de Nopal*/día kg	0.000	0.119 ^a	0.019 ^b	0.005	<.0001
Consumo de Alimento® Total kg	26.445 ^b	26.032 ^b	35.899 ^a	1.82	0.001
Consumo de Nopal*Total kg	0.000	3.343 ^a	0.545 ^b	0.17	<.0001
Peso Final kg	29.600	29.525	31.109	1.55	0.693
Ganancia Diaria de Peso kg	0.684	0.680	0.673	0.033	0.954

GT= Grupo Testigo; GNBF= Grupo con nopal base fresca (BF); GNE= Grupo con extrusado de nopal; Prom= Promedio; EE= error estándar; *= BF o Extrusado

Literales ^{a,b} indican diferencias estadísticas ($p<0.05$) entre promedios dentro de fila.

Para el caso del consumo de alimento comercial Total promedio/lechón, este fue mayor ($p<0.05$) en el GNE (35.899 kg) vs GT y GNBF, en los cuales los consumos de alimento fueron similares (≤ 26.445 kg/lechón). En cuanto al consumo promedio de nopal (BF o Extrusado) total/lechón, en el GNBF fue de 3.343 kg/lechón vs 545 g/lechón en el GNE; ambos promedios diferentes

entre sí ($p < 0.05$) (Tabla 2). Por último, el peso promedio de los lechones al finalizar la 6^{ta} semana de la fase de iniciación fue similar ($p > 0.05$) en los tres grupos analizados: ≥ 29.525 kg/lechón; teniendo GDP similares ($p > 0.05$) en los grupos analizados: ≥ 658 g/día/lechón (Tabla 2). En cuanto a la correlación entre las variables productivas y los metabolitos energéticos no se encontró relación ($p > 0.05$).

Discusión

Analizar los efectos sobre el metabolismo de un nuevo aditivo (específicamente en este trabajo el nopal) en una etapa específica y compleja, como lo es la fase de iniciación de los lechones (Song *et al.*, 2021), es de suma importancia sobre todo porque esta cactácea ha demostrado tener efectos hipoglucemiantes e hipocolesterolémicos (Elshehy *et al.*, 2021). Al respecto, la investigación de Maya-Ortega *et al.* (2021) reporta niveles de glucosa sanguínea (GLU) en lechones en fase de iniciación sin ningún aditivo que van desde los 100 mg/dL hasta los 130 mg/dL, rango en el cual entran los datos encontrados en esta investigación para el GT y GNE. Por otro lado, los niveles de GLU en el GNBF fueron menores ($p < 0.05$). En relación con esto, se ha establecido que la adición del 1% de nopal en BF (porcentaje respecto al peso del animal) a cerdas lactantes provoca una disminución de GLU (Ordaz *et al.*, 2020), fenómeno que también sucedió en esta investigación al adicionar el mismo porcentaje (respecto al peso del animal) a la dieta de lechones destetados.

El efecto hipoglucemiante del nopal (*Opuntia spp.*) se ha estudiado en diversas especies y en distintas patologías. Ahumada (2021) atribuye este efecto a la fibra del nopal, sugiere que la fibra aumenta la viscosidad del bolo alimenticio disminuyendo su absorción a nivel intestinal y así, permitir el uso de los componentes lipídicos y de la glucosa que ya se encuentran en el organismo para su utilización. Sin embargo, otros estudios han atribuido el efecto hipoglucemiante a los compuestos bioactivos del nopal, como los flavonoides, en donde sugieren que estos actúan en las rutas metabólicas de la glucosa que no permite su absorción (Moradi-Marjaneh *et al.*, 2019; Alqudah *et al.*, 2024). Posiblemente, en este trabajo, la disminución de GLU en el GNBF se debió a estos factores mencionados.

Por otro lado, no se observó el efecto hipoglucemiante en el GNE. En cuanto a esto, y relacionado a que el efecto hipoglucemiante puede estar relacionado con los componentes bioactivos del nopal, Galvan-Aguilar *et al.* (2024) reportan valores similares ($p > 0.05$) de

compuestos fenólicos y flavonoides en nopal (*Opuntia ficus indica*) en BF y cuando se somete a proceso de extrusión. No obstante, puede ser que la cantidad necesaria de nopal extrusado que se adicione a la dieta deba ser mayor para observar el efecto hipoglucemiante; pues en esta investigación se adicionó el 0.1% respecto al peso semanal del lechón vs el 1% de nopal en BF.

En cuanto a las concentraciones de colesterol total (COL) y triglicéridos (TG) en sangre, Maya-Ortega *et al.* (2021) reporta valores en lechones en fase de iniciación de 93-106 mg/dL para COL, y Sotira *et al.* (2020) reporta un promedio de TG en fase de iniciación de 60.23 ± 4.43 mg/dL, valores que son más altos que los encontrados en esta investigación (Figura 2). Esta diferencia puede deberse a distintos factores como los ingredientes de la dieta (Sorhue *et al.*, 2022), genética (Martins *et al.*, 2019), entre otros. Por otro lado, en relación con el comportamiento de estos metabolitos durante la fase experimental (Figura 2), primeramente, los valores iniciales distintos ($p < 0.05$) entre grupos, puede deberse posiblemente al nivel de estrés que poseía cada individuo (cada lechón), pues los niveles de COL y TG se elevan en condiciones de estrés (Sandrini *et al.*, 2020). Sin embargo, a partir de la segunda semana y el resto de la fase experimental, los valores de todos los grupos fueron similares (Figura 2).

Respecto el efecto del nopal sobre los niveles de COL y TG, Ahumada (2021) reportó disminución de estos metabolitos en cerdas lactantes a las que se les adicionó el 1% (porcentaje respecto al peso del animal) de nopal en BF respecto a los de su grupo testigo. A pesar de la actividad hipocolesterolémica atribuida al nopal (Blando *et al.*, 2022), no se observó en este trabajo, esto probablemente a que el metabolismo de los animales en las distintas fases (lactancia e iniciación) también son diferentes.

En los lechones en fase de iniciación, el sistema digestivo se encuentra poco desarrollado, en este sentido, la capacidad de digestión y absorción de las grasas se encuentra muy reducida (He *et al.*, 2022) y, además está íntimamente relacionada con los valores sanguíneos de COL y TG (Dai *et al.*, 2024). Por tal razón, es posible que no se observara ningún cambio dentro de los grupos de esta investigación a pesar de la adición de nopal (BF o extrusado), pues su absorción se vio limitada y con esto, limitada su concentración en sangre. Sin embargo, también se ha establecido que en el hígado se sintetiza el COL necesario para el organismo independientemente de el que se consuma en la dieta (Paul *et al.*, 2022), pues esta molécula es indispensable para la función de distintos órganos y sistemas del organismo, así como también

es fundamental para la formación de las paredes celulares (Schade *et al.*, 2020). Por otro lado, los niveles de TG en sangre dependen de la cantidad de tejido graso en el organismo (Borén *et al.*, 2022), puesto que en esta etapa (fase de iniciación) el principal objetivo es el crecimiento y desarrollo del animal, la deposición de tejido graso es mínima y, por lo tanto, los niveles de TG en sangre también.

Respecto a las variables productivas, se vio afectado únicamente el consumo de alimento®, el cual fue mayor ($p < 0.05$) en GNE (Tabla 2). Esto pudiera asociarse al efecto del ayuno (2 horas) establecido para que los lechones del GNE pudieran consumir el total de nopal extrusado ofrecido $\text{día}^{-1} \text{lechón}^{-1}$. Puesto que, este fenómeno se ha observado en la investigación de Serrano *et al.* (2008) quienes encontraron que cerdos con una restricción de alimento y posterior acceso *ad libitum* comieron más (9%), crecieron más (20%) y tuvieron una mejor conversión alimenticia (13%). Sin embargo, de acuerdo con los resultados, se esperaría que el GNBf tuviera un mayor consumo de alimento® pero no sucedió así.

Se ha determinado que los niveles bajos de glucosa en sangre producen sensación de hambre (Gromova *et al.*, 2021), no obstante, también se ha establecido que el nopal en BF posee una gran cantidad de fibra soluble (Hernández-Becerra *et al.*, 2022), estos componentes (mucílago y pectinas) son emulsificantes (Shoukat *et al.*, 2023), lo que ocasiona un aumento en el tiempo de vaciado gástrico y sensación de saciedad más prolongada (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021), lo que pudiera explicar el menor consumo de alimento® del GNBf a pesar de los niveles de GLU.

Conclusión

La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) no muestra tener efectos sobre los niveles de glucosa, colesterol y triglicéridos sanguíneos, y además no tienen relación con las variables productivas. Así mismo, en esta etapa (fase de iniciación) no se muestran variaciones en los niveles de colesterol y triglicéridos en ninguno de los tres grupos, por lo que se sugiere seguir estudiando lo que sucede en las rutas metabólicas de estos en los lechones en etapa de iniciación.

Bibliografía

- Ahumada G.J.T. 2021. “Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cocido a la dieta de cerdas postparto sobre: perfil metabólico y consume voluntario de alimento”. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Alqudah S.M., Hailat M., Zakaraya Z., Abu-Daya A.A., Abu-Assab M., Alarman S.M., Awad R.M., Hamad M.F., Vicas L.G., Abu-Dayyid W. 2024. “Impact of *Opuntia ficus-indica* juice and empagliflozin on glycemic control in rats”. *Current Issues in Molecular Biology*. 46: 12343-12353.
- Blando F., Albano C., Jiménez-Martínez C., Cardador-Martínez A. 2022. “*Opuntia, ficus-indica* [L.] Mill. And other species. Source of bioactives and their molecular mechanisms of action to promote human health”. At *Molecular Mechanisms of Functional Food*. Ed. Rocío Campos-Vega and B. Dave Oomah.
- Borén J., Taskinen M.R., Bjornson E., Packard C.J. 2022. “Metabolism of triglyceride-rich lipoproteins in health and dyslipidaemia”. *Nature Reviews Cardiology*. 19: 577-592.
- Canibe N., Hojberg O., Kongsted H., Vodolazska D., Lauridsen C., Skau N.T., Schonhertz A.A. 2022. “Review on Preventive Measures to Reduce Post-Weaning Diarrhea in Piglets”. *Animals*. 12(19).
- Choton S., Gupta N., Bandral J.D., Anjum N., Choudary A. 2020. “Extrusion technology and its application in food processing: A review”. *The Pharma Innovation Journal*. 9(2): 162-168.
- Coutiño-Laguna B.C., Cruz-Requena M., Palomo-Ligas L., Segura-Almaraz K.L., Chávez-García S.N., Nery-Flores S.D., Rodríguez-Herrera, R. 2021. “*Opuntia* Fiber and Its Health-Related Beneficial Properties”. At *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*, 299-330.
- Dai F., Zhao S., Huang X., Yu H., Lin T., Jin M., Ma J., Chen Y., Li C. 2024. “Effects of dietary fat sources on growth performance, lipid metabolism and intestinal health of weaned piglets”. *Journal of Applied Animal Research*. 54(1).
- Das G., Lim K.J., Tantengco OAG., Carga HM., Goncalves S., Romano A., Kumar DS., Coy-Barrera E., Han-Seung S., Gutiérrez-Grijalva EP., Heredia JB., Kumar PJ. 2020. “Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”. *Phytotherapy Research*. 1-36.
- Elshehy H., Salah S., Abdel-Mawla E., Agamy N. 2020. “Protective Effect of *Opuntia ficus-indica* against Diabetes in Alloxan-induced Diabetic Rats”. *Canadian Journal of Clinical Nutrition*. 8(2): 20-34.
- Gaitán-Lemus S.B., Ordaz-Ochoa G., Val-Arreola D., Martínez-Flores H.E., Ortiz-Rodríguez R. 2018. “Diet supplemented with nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifies productive behavior and blood profile in pigs”. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 17(1): 39-50.
- Galvan-Aguilar M., Pérez-Sánchez R.E., Ortiz-Rodríguez R., Luna-Cruz A., Altamirano-Hernández J., Val-Arreola D. 2024. “Comparación de los valores de los compuestos

- bioactivos (fenoles y flavonoides totales) y actividad antioxidante del nopal (*Opuntia ficus indica*) verdura y forrajero postproceso de extrusión”. IV Foro Internacional Red IINOCA. 23-25 de octubre de 2024. Escobedo, Nuevo León.
- Gromova L.V., Fetissov S.O., Gruzdkov A.A. 2021. “Mechanisms of glucose absorption in the small intestine in health and metabolic diseases and their role in appetite regulation”. *Nutrients*. 13(7): 2474.
- Hernández-Becerra E., Aguilera-Barreiro M.A., Contreras-Padilla M., Pérez-Torrero E., Rodríguez-García M.E. 2022. “Nopal cladodes (*Opuntia ficus-indica*): Nutritional properties and functional potential”. *Journal of Functional Foods*. 95: 105183.
- He Y., Liu N., Ji Y., Tso P., Wu Z. 2022. “Weaning stress in piglets alters the expression of intestinal proteins involved in fat absorption”. *The Journal of Nutrition*. 152(11): 2387-2395.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico del Estado de Guanajuato. [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092146.pdf [Consulta septiembre 2024]
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024]
- Littell R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. “Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures”. *Journal of Animal Science*. 76(1): 1216- 1231.
- Li X., Chen Y., Chen X., Zhang S., Dong X., Chi S., Deng J., Tan B., Xie S. 2022. “Cholesterol supplementation improved growth performance, cholesterol metabolism, and intestinal health of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed a low fishmeal diet”. *Aquaculture Reports*. 27.
- Louis P., Flint H.J., Michel C. 2016. “How to manipulate the microbiota: prebiotics”. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 902: 119-142.
- Martins J.M., Fialho R., Albuquerque A., Neves J., Freitas A., Nunes J.T., Charneca R. 2019. “Growth, blood, carcass and meat quality traits from local pigs’ breeds and their crosses”. *Animal*. 1-12.
- Maya-Ortega C.A., Ángel-Isaza J.A., Martínez-Morales B.C., Parra-Suescún J.E. 2021. “Aceite esencial de orégano (*Lippia origanoides*) mejora parámetros productivos y metabólicos sanguíneos en lechones”. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 19(2): 82-93.
- Monger X.C., Gilbert A.A., Saucier L., Vincent A.T. 2021. “Antibiotic Resistance: From Pig to Meat”. *Antibiotics*. 10(1): 1209.
- Moradi-Marjaneh R., Paseban M., Sahebkar A. 2019. “Natural products with SGLT2 inhibitory activity: Possibilities of application for the treatment of diabetes”. *Phytotherapy Research*.

- Ordaz G., Juárez A., Pérez R.E., Martínez H.E., Ortiz R. 2020. “Effects of *Opuntia ficus-indica* in the diet of primiparous sows on the metabolic profile during late gestation and lactation and feed intake during lactation”. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 00:1-12.
- Ortiz R., López M., Pérez R.E., Ramírez P.P., Ordaz G. 2020. “Effect of the inclusion of different levels of dietary cactus (*Opuntia ficus-indica*) on gilts’ biochemical parameters and feed intake during lactation”. *Animals*. 10(1).
- Ortiz R.R., Ahumada G.J.T., Pérez S.R.E., García-Saucedo P.A., Martínez-Flores H.E., Val A.D. 2022.” Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times”. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24(1): 42-253.
- Osorio-Córdoba J., Pelayo-Zaldívar C., Verde-Calvo J.R., Ponce-Valadez M., Díaz de León-Sánchez F., Bosquez-Molina E., Rodríguez-Huenso M.E. 2011. “Conservación de nopal verdura Milpa Alta (*Opuntia ficus-indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10(1): 93-104.
- Paul B., Lewinska M., Andersen J.B. 2022. “Lipid alterations in chronic liver disease and liver cancer”. *JHEP Reports*. 4(6): 100479.
- Peña-Montes C., Ramírez-Higuera A., Morales-Cano K.L., Lagunes-Vela K.G., Mendoza-García P.G., Oliart-Ros R.S. 2022. “Prebióticos y microbiota: Factores clave en el síndrome metabólico”. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*. 25.
- Pérez SI. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”. Tesis de Maestría. Facultad de Químico farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Sandrini L., Ieraci A., Amadio P., Zarà M., Barbieri S.S. 2020. “Impact of acute and chronic stress on thrombosis in healthy individuals and cardiovascular disease patients”. *International Journal of Molecular Science*. 21(21).
- Schade D.S., Shey L., Eaton R.P. 2020. “Cholesterol review: a metabolically important molecule”. *Endocrine Practice*. 26(12): 1514-1523.
- Serrano M.P., Valencia D.G., Lázaro R., González-Mateos G. 2008. “La restricción alimenticia como herramienta para cumplir con la norma para cerdos Ibéricos”. [En línea] https://www.3tres3.com/es-mx/articulos/la-restriccion-alimenticia-como-herramienta-para-cumplir-con-la-norma_1397/ [Consulta 15 diciembre 2024].
- Shoukat R., Cappai M., Pia G., Pilia L. 2023 “An updated review: *Opuntia ficus-indica* (OFI) chemistry and its diverse applications”. *Applied Sciences*. 13(1).
- Song M., Zhang F., Chen L., Yang Q., Su H., Yang X., He H., Ling M., Zheng J., Duan C., Lai X., Jiang Q., Wang S. 2021. “Dietary chenodeoxycholic acid improves growth performance and intestinal health by altering serum metabolic profiles and gut bacteria in weaned piglets”. *Animal Nutrition*. 7(1): 365-375
- Sorhue U.G., Akporhualto P.O., Moemeka A.M., Irikefe E.E.P., Udeh I. 2022. “Hematological and serological indices of crossbred pigs fed different unconventional feeds”. *Porcine Research*. 12(1): 25.

- Sotira S., Dell’Anno M., Caprarulo V., Hejna M., Pirrone F., Callegari M.L., Vieira T.T., Rossi L. 2020. “Effects of tributyrin supplementation on growth performance, insulin, blood metabolites and gut microbiota in weaned piglets”. *Animals*. 10(4): 726.
- Tang X., Xiong K., Fang R., Li M. 2022. “Weaning stress and intestinal health of piglets: A review”. *Frontiers in Immunology*. 13(1):1-14.
- Trindade S., Rouxinol M.I., Agulheiro-Santos A.C. 2023. “*Opuntia ficus-indica* L. Fruits Cold Storage Using Different Packaging Materials”. *Sustainability*. 15(14).
- Wadstrom K., Jacobsson L., Mohammad A., Warrington K.J., Matteson E.L., Turesson C. 2020. “Negative associations for fasting blood glucose, cholesterol and triglyceride levels with the development of giant cell arteritis”. *Rheumatology*. 59(1): 3229-3236.

CAPÍTULO V

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES (6 a 30 KG) SOBRE CONSUMO DE ALIMENTO Y VARIABLES PRODUCTIVAS

Resumen

Se determinó el efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre el consumo de alimento y las variables productivas. Se utilizaron 30 lechones destetados (21 ± 2 días de edad) seleccionados al azar. Se analizaron dos etapas (E): E1 o adaptación (14 días) a la fase de iniciación (FI) y E2 o post-adaptación a la FI (duración 28 días). En E1, se conformaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹): Grupo testigo (GT), Grupo nopal en base fresca (GNBF) y Grupo nopal extrusado (GNE); estos grupos recibieron alimento® específico para la FI. Al alimento del GNBF se le adicionó 1.0% de nopal en base fresca (BF). Al alimento del GNE se le adicionó 0.1% de extrusado de nopal. El porcentaje de nopal (BF y extrusado) fue con base al peso lechón⁻¹. En la E2, se subdividió a los tres grupos de la E1 ($n=5$ lechones subgrupo⁻¹): subgrupo GTa, continuó como testigo, subgrupo GNBFa, continuó con adición de nopal BF; subgrupo GRNBF, se restringió la adición de nopal BF; subgrupo GNEa continuó con adición de extrusado y subgrupo GRNE, se restringió el extrusado. Se evaluó consumo de alimento (CA), peso (P), ganancia de peso (GP) e índice de conversión alimenticia (ICA). La información se analizó a través de mediciones repetidas. Las diferencias entre grupos y/o subgrupos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados a un $\alpha=0.05$. El peso final en la E1 fue mayor ($p<0.05$) en el GNE (12.955 kg) vs el GT y GNBF. El peso final en la E2 fue similar ($p>0.05$) en los cinco subgrupos (≥ 29.525 kg). La GP diario en la E1 fue mayor ($p<0.05$) en el GNE (0.426 g día⁻¹); en la E2, fue similar ($p>0.05$) en todos los subgrupos (≥ 658 g día⁻¹). El ICA, en la E1, fue similar ($p>0.05$) en los tres grupos; pero, en la E2, fue mejor para GNBFa (1.7) y GRNBF (1.6). En la etapa de adaptación a la fase de iniciación la ganancia diaria de peso mejora con la adición de nopal extrusado; después, dicha variable no muestra mejoría con lo cual el índice de conversión alimenticia se incrementa.

Palabras clave: destete, estrés, eficiencia productiva.

Introducción

El sector porcino de México requiere ser eficiente tanto productiva como económicamente para satisfacer la demanda interna de carne de cerdo (Morales, 2023) y para ello, es esencial optimizar las fases inherentes a la producción del cerdo: servicio, parto-lactancia, destete-iniciación, crecimiento-desarrollo y finalización (Campoy *et al.*, 2019). Sin embargo, la fase de destete-iniciación -por ser la fase más compleja- es donde se debe poner mayor atención; ello, debido a los efectos estresantes que experimenta el lechón recién destetado (separación de la cerda, transporte, cambio de alimento, alojamiento en nuevas instalaciones y agrupamiento con lechones extraños), los cuales afectan directamente al sistema digestivo y al inmunológico comprometiendo la salud y futuro desarrollo de estos animales en la fase de iniciación y en las subsiguientes (Tang *et al.*, 2022).

Es un hecho que la separación de los lechones de su madre y el nuevo ambiente -al que se someten una vez destetados- son los principales factores estresante para estos animales (Van *et al.*, 2023). Pero, el estrés postdestete desencadena una serie de eventos de forma simultánea que impactan de forma negativa al sistema digestivo del lechón (Ilchmann-Diounou y Menard, 2020): se instaura un proceso inflamatorio intestinal (Zheng *et al.*, 2021) y disminuye el consumo voluntario de alimento (Middelkoop *et al.*, 2020).

Aunado a la disminución del consumo voluntario de alimento (Monger *et al.*, 2021; Canibe *et al.*, 2022) del lechón recién destetado, el proceso inflamatorio intestinal provocado por el estrés del destete provoca: a) alteración de la secreción y absorción de líquidos -lo que imposibilita mantener la viscosidad del contenido luminal y servir como barrera ante patógenos; b) atrofia de las vellosidades e hiperplasia de las criptas en el intestino delgado; c) disminución del área de absorción intestinal y, d) mayor susceptibilidad a patógenos entéricos y diarreas mecánicas (Salvo-Romero *et al.*, 2015; Patankar y Becker, 2022). Así la disminución del consumo de alimento y la inflamación intestinal -por separado o en conjunto- contribuyen con los desórdenes endocrinológicos y metabólicos del lechón destetado (Van *et al.*, 2023) y retardan el desarrollo del lechón en la fase de iniciación y el tiempo para alcanzar el peso al mercado (Zheng *et al.*, 2021).

Ante el impacto negativo del estrés postdestete del lechón -en la fase de iniciación-, se requieren de estrategias preventivas o que mitiguen dichos efectos, sobre todo en la primera semana de la

fase de iniciación; las posibles estrategias podrían ser: distractores (Espejo-Beristain *et al.*, 2020), temperaturas óptimas (Gómez *et al.*, 2022), edad al destete (Ming *et al.*, 2021), administración de antibióticos (Flores *et al.*, 2015) o uso de alimentos nutracéuticos (Zheng *et al.*, 2021), entre otras estrategias más. Sin embargo, en los sistemas intensivos, es más común que implementen estrategias de temperaturas (recibir lechones en el área de destete a temperatura similar a la que estuvo expuesto durante la última semana de lactancia) y a la mezcla de lechones del mismo peso y sexo (Trollet *et al.*, 2019). Puesto que, el uso de antibióticos en el alimento no es recomendable, debido a que se presenta resistencia a los antibióticos (Loor, 2024). De aquí que, actualmente, el uso de nutracéuticos es la estrategia que mayores beneficios produce en la salud gastrointestinal (Das *et al.*, 2020).

Dentro de los alimentos con actividad nutracéutica se encuentra el nopal (*Opuntia spp*) el cual es susceptible de utilizarse en la alimentación del cerdo (Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2021) debido a las distintas propiedades que se le han atribuido tales como: antiinflamatorio, antioxidante, prebiótico, entre otras más (Elshehy *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha establecido que tanto la mano de obra para el picado y suministro del nopal a los cerdos y la corta vida de anaquel de esta cactácea no hacen viable su uso a gran escala (Ortiz *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2023). Por lo que, se han buscado alternativas y procesos que permitan conservar el nopal por más tiempo y en donde sus propiedades no se vean afectadas (Osorio-Córdoba *et al.*, 2011; Ortiz *et al.*, 2022).

Una de las alternativas para conservar el nopal es la extrusión, proceso que abarca la cocción y presión del alimento por un corto periodo de tiempo, que trae consigo ventajas de técnicas, costos y calidad (Choton *et al.*, 2020), que en el caso del nopal tiene ventaja; puesto que, esta cactácea es sensible a temperaturas mayores a 50°C (Pérez, 2021) y la extrusión permite su procesamiento a temperaturas menores. Sin embargo, aún no se han estudiado los efectos del nopal extrusado cuando se adiciona a la dieta de los cerdos. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la adición de nopal (*O. ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación sobre el consumo de alimento y las variables productivas.

Material y Métodos

La investigación se llevó a cabo en el Sector porcino de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo ubicada en el municipio de

Tarímbaro, Michoacán, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar y ubicada en las coordenadas 19°19'N 101°10'O (INEGI, 2017).

Para el logro del objetivo de esta investigación, la fase experimental (6 semanas) se dividió en dos etapas: Etapa 1, adaptación a la fase de iniciación y Etapa 2, post-adaptación a la fase de iniciación; la Etapa 1 abarcó los primeros 14 días (2 semanas) postdestete, mientras que la Etapa 2 tuvo una duración de 28 días (4 semanas), del día 15 al 42 de la fase de iniciación.

Se utilizaron 30 lechones destetados (21 ± 2 días de edad) de ambos sexos seleccionados al azar, con un peso de 7.2 ± 0.8 kg. El genotipo de estos animales fue de línea genética para magrez de la canal y velocidad de crecimiento, mismos que fueron identificados por medio de muescas.

En la etapa de adaptación a la fase de iniciación (Etapa 1), con los 30 lechones se conformaron tres grupos ($n=10$ lechones grupo⁻¹; lechón⁻¹ considerado como una repetición): Grupo 1 o testigo (GT), a cada lechón de este grupo se le proporcionó alimento comercial convencional específico para la etapa 6 a 25 kg de peso vivo (Tabla 1); Grupo 2 (GNBF), en este grupo a cada lechón se le ofreció alimento convencional para esta etapa adicionado con 1.0% de nopal en BF (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) y Grupo 3 (GNE), al cual se le proporcionó alimento convencional con la adición de 0.01% de extrusado de nopal (porcentaje con base al peso vivo semana⁻¹ del lechón) (Tabla 1).

Tabla 1. Composición nutricional del alimento, nopal en BF y extrusado suministrados.

Composición, %	Fase			Nopal	
	1	2	3	BF	Extrusado
Humedad	12	12	12	93	12
Proteína cruda	19.5	19	19	7.2	6.2
Fibra cruda	3	3.4	3.6	7.8	14.5
Extracto Etéreo	5	5	4.5	2.4	1.3
Extracto libre de nitrógeno	54.3	54.6	55.4	62.1	51.2
Cenizas	6	6	5.5	20.5	26.8

Etapa 2, transcurridos 14 días de la primera etapa de la fase experimental, se seleccionaron al azar cinco lechones del GT, los cuales formaron el subgrupo GTa. Mientras que el GNBF y GNE se subdividieron a su vez en dos subgrupos cada uno ($n= 5$ lechones subgrupo⁻¹). La formación de los subgrupos tuvo como objetivo determinar si existió efecto residual de la dieta adicionada con nopal (extrusado y/o en BF) en el comportamiento productivo de estos animales durante esta etapa.

Los grupos quedaron como sigue: GTa, continuó con el alimento comercial específico para la fase de iniciación (FI); GNBFa, continuó con el alimento para FI más nopal en BF; GRNBF, se le retiró la adición del nopal y solo se le suministró alimento para la FI; GNEa, se continuó con la adición de extrusado de nopal más alimento FI y GRNE, se le suspendió la adición de extrusado de nopal y continuó con el alimento para FI.

Cada lechón grupo⁻¹ se confinó en jaula individual elevada al piso, la cual contenía: un comedero de aluminio confeccionado especialmente para la alimentación individual (28x16 cm; Largo y Ancho, respectivamente) y un bebedero automático tipo chupón. La ventilación del área de iniciación se controló a través del manejo de cortinas, la temperatura dentro de la maternidad osciló entre 20.9 y 31.4 °C durante la fase experimental.

El alimento convencional para la FI suministrado a los grupos y el agua de bebida se ofrecieron *ad libitum*. Para el caso del suministro total día⁻¹ lechón⁻¹ del alimento convencional, primeramente, se calculó el consumo animal⁻¹ día⁻¹ de acuerdo con su peso semana⁻¹ y se agregó una cantidad extra para considerar alimentación *ad libitum*. Una vez establecida la cantidad de alimento, esta se fraccionó en tres porciones para suministrar; cada porción se suministró a las 8:30, 11:30 y 18:30 h. Mientras que la adición del 1.0% de *O. ficus-indica* en BF y la adición de 0.01% de extrusado de nopal, se realizó diariamente a las 9:30 h. Una vez obtenido el peso lechón⁻¹ semana⁻¹ se determinó la cantidad requerida de nopal y/o extrusado semana⁻¹ para adicionarse al alimento.

El nopal forrajero (*O. ficus-indica*) suministrado (tanto en BF como para el extrusado) se obtuvo de una parcela ubicada en la comunidad de Trinidad de los Ángeles, Guanajuato, con coordenadas: 20.19694 N y 101.69861 O, a una altura de 2140 msnm, con temperaturas mínimas de 7°C y máximas de 30°C y una precipitación pluvial media de 20 mm (INEGI, 2017). Los cladodios seleccionados fueron de una edad de tres meses. En caso de la adición en BF, una vez cosechados estos fueron picados en trozos de aproximadamente 1 cm² para poder ser suministrados a los cerdos.

Para el proceso de extrusión, primeramente, los cladodios de nopal se cortaron en trozos de 2 cm³ para molerse en una licuadora de uso doméstico (Oster- BLST4127) y obtener una pasta del nopal, misma que se distribuyó uniformemente y con un espesor de ≈ 1 cm en bandejas (45x33.5x6.4 cm) de aluminio (Ekco®). Posteriormente, las charolas con la pasta se colocaron

en un horno con ventilación forzada (capacidad para 8.0 kg) a una temperatura de 50°C hasta que la pasta alcanzó 37% de humedad; porcentaje de humedad requerido para el proceso de extruido.

El proceso de extruido del nopal se desarrolló con un molino® manual específico para dicho proceso; obtenido el extrusado de nopal, este se colocó nuevamente en las bandejas de aluminio y se llevó al horno de ventilación forzada a 50 °C hasta que el extrusado de nopal alcanzó 12% de humedad (Norma Mexicana: NMX-Y-098-SCFI-2018).

Las variables por analizar cerdo⁻¹ grupo⁻¹ fueron: consumo de alimento (CA), peso semanal (PS), ganancia de peso (GP), consumo de alimento comercial total (CAT) e índice de conversión alimenticia (ICA).

El CA (tanto de alimento para FI como de nopal en BF y extrusado) se determinó mediante la resta entre la cantidad de alimento comercial y nopal suministrados día⁻¹ menos el rechazo de alimento comercial y nopal día⁻¹. El cálculo del rechazo de alimento día⁻¹ se realizó a las 7:30 h, una vez retirado el sobrante de alimento del día anterior. Para ello, primeramente, se separó el nopal del alimento comercial de forma manual y posteriormente se pesó el alimento comercial y el nopal por separado. Las cantidades (kg) de alimento suministrado (alimento comercial y/o nopal en BF) día⁻¹ cerdo⁻¹ y sobrante se pesaron con una báscula SF-400® con una capacidad de 5 kg y precisión de 1 g. Para el caso de la determinación del CAT, se sumó el consumo de alimento convencional durante las 6 semanas que duró la fase experimental experimento.

El PS lechón⁻¹ se obtuvo mediante una báscula digital portátil MiniCraneScale® modelo WH-C100 con capacidad de 100 kg.

El establecimiento de la GP se obtuvo a través de la siguiente ecuación:

$$GP = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Tiempo}}$$

El ICA se determinó mediante la división del consumo de alimento total entre la ganancia de peso total.

La información recabada se analizó a través de la metodología de mediciones repetidas utilizando para ello el modelo de efectos fijos (Littell *et al.*, 1998) bajo los siguientes modelos:

$$\text{Etapa 1. } y_{ijk} = \mu + G_i + G(S)_{ij} + e_{ijk}$$

Dónde:

y_{ijk} = Variable respuesta = CA, PS, GP, CAT, ICA.

μ = Promedio general

G_i = Efecto del Grupo con i-ésimo grupo = GT, GNBf y GNE

$G(S)_{ij}$ = Efecto fijo la anidación Grupo(semána) con el i-ésimo grupo = GT, GNBf, GNE; y la j-ésima semana de la fase de iniciación = 1 y 2.

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim \text{NID}=0, \sigma^2_e$)

$$\text{Etapa 2. } y_{ijk} = \mu + \text{Sub}G_i + \text{Sub}G(S)_{ij} + e_{ijk}$$

Dónde:

y_{ijk} = Variable respuesta = CA, PS, GP, CAT, ICA.

μ = Promedio general

$\text{Sub}G_i$ = Efecto del SubGrupo con i-ésimo SubGrupo = GTa, GNBfa, GRNBf, GNEa y GRNE

$\text{Sub}G(S)_{ij}$ = Efecto fijo la anidación SubGrupo(semána) con el i-ésimo SubGrupo y la j-ésima semana de la fase de iniciación = 3, 4, 5 y 6.

e_{ijk} = Error aleatorio asociado a cada observación ($\sim \text{NID}=0, \sigma^2_e$).

Las diferencias entre grupos se obtuvieron mediante la prueba de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un $\alpha < 0.05$ (Littell *et al.*, 1998).

Resultados

Etapa 1, adaptación a la fase de iniciación

En esta Etapa, se encontró que el Grupo afecto ($p < 0.05$) a la mayoría de las variables evaluadas, excepto a las variables peso al inicio de la fase de iniciación e índice de conversión alimenticia ($p > 0.05$) (Tabla 2). En cuanto al peso del inicio, este fue similar en los tres grupos evaluados

(Tabla 2). En lo que respecta al peso final de la 1ª y 2ª semana de la Etapa 1, en ambas semanas este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNE (8.966 y 12.955 kg lechón⁻¹, respectivamente) vs el GT y GNBF; cuyos promedios -en estos dos grupos- fueron similares entre sí ($p > 0.05$): ≤ 7.677 y ≤ 10.522 kg lechón⁻¹, para el peso final de la 1ª y 2ª semana de la Etapa 1, respectivamente (Tabla 2, Figura 1).

Tabla 2. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el Grupo

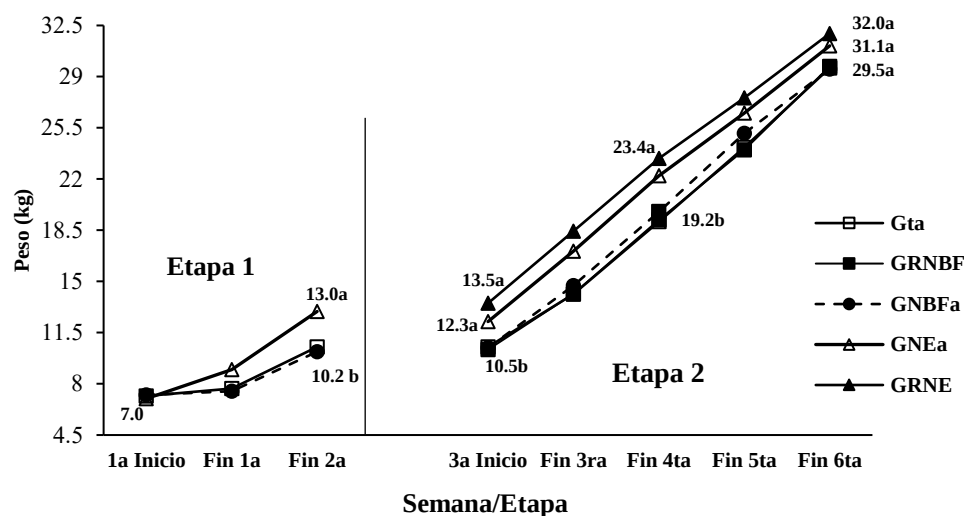
Variable	Etapa 1				
	GT	GNBF	GNE	±EE	Pr > t
Peso Inicial kg	7.172	7.238	6.988	0.23	0.73
Peso Final 1ª Semana kg	7.677 ^b	7.505 ^b	8.966 ^a	0.35	0.014
Consumo de Alimento®/día kg	0.291 ^b	0.257 ^b	0.482 ^a	0.03	<0.001
Consumo de Nopal*/día kg	0.000	0.054 ^a	0.007 ^b	0.002	<0.001
Consumo de Alimento® Total kg	4.081 ^b	3.607 ^b	6.755 ^a	0.29	<0.001
Consumo de Nopal* Total kg	0.000	0.753 ^a	0.103 ^b	0.025	<0.001
Peso Final 2ª semana kg	10.522 ^b	10.200 ^b	12.955 ^a	0.42	0.001
Ganancia de Peso Total	3.350 ^b	2.961 ^b	5.966 ^a	0.31	<0.001
Ganancia Diaria de Peso kg	0.239 ^b	0.211 ^b	0.426 ^a	0.04	0.003
Índice de Conversión Alimenticia	1.9	1.9	1.3	0.38	0.44

GT= Grupo Testigo; GNBF= Grupo con nopal base fresca (BF); GNEEx= Grupo con extrusado de nopal; EE= error estándar; *= BF o Extrusado

Literales ^{a,b} indican diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre promedios dentro de fila.

En lo que respecta al consumo de alimento comercial, específico para la Etapa 1, este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNE (482 g día⁻¹ lechón⁻¹) vs GT (291 g día⁻¹ lechón⁻¹) y GNBF (257 g día⁻¹ lechón⁻¹). En cuanto al consumo de nopal (BF o Extrusado), este fue de 54 y 7 g día⁻¹ lechón⁻¹, para el GBF y GNE, respectivamente. Consumos de alimento y nopal que impactaron el consumo total en dicha Etapa: mayor ($p < 0.05$) en el GNE (6.755 kg lechón⁻¹) vs GT y GNBF (Tabla 2).

En cuanto a la ganancia de peso total (GPT) y ganancia diaria de peso (GDP) en la Etapa 1, el GNE mostró un mejor comportamiento (5.966 kg lechón⁻¹ y 239 g día⁻¹ lechón⁻¹, respectivamente); ello, en comparación con el GT y GNBF (≤ 3.350 kg lechón⁻¹ y ≤ 239 g día⁻¹ lechón⁻¹). Para el caso del índice de conversión alimenticia (ICA), los tres grupos evaluados mostró similar comportamiento (≤ 1.9) (Tabla 2).



GTa= SubGrupo testigo; GRNBF= SubGrupo retiro de nopal en base fresca; GNBFa= SubGrupo de nopal en BF; GNEa= SubGrupo de nopal extrusado; GRNE= Grupo de retiro de nopal extrusado

Figura 1. Dinámica de crecimiento (kg) de lechones en fase de iniciación de acuerdo con la semana de la fase y al SubGrupo

Etapas 2, post-adaptación a la fase de iniciación

En cuanto a los resultados de la Etapa 2, se encontró efecto de SubGrupo sobre la mayoría de las variables analizadas en esta etapa, excepto en las variables peso promedio final, GPT y GDP ($p > 0.05$) (Tabla 3). Para el caso del peso promedio inicial de los lechones (3^{ra} semana de la fase de iniciación) este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNEa (12.262 kg/lechón) y en el SubGrupo al que se le retiró el nopal extrusado (GRNE) al inicio de la Etapa 2 (13.510 kg/lechón) vs GTa, GNBFa y al SubGrupo al cual se le retiró el nopal en BF (GRNBF) al inicio de la Etapa 2 (Tabla 3, Figura 1).

En relación con el peso final de la 3^{ra} semana de la Fase de iniciación, de acuerdo con los SubGrupos analizados, el GNEa y GRNE mostraron mayor ($p < 0.05$) peso promedio (17.062 y 18.440 kg lechón⁻¹) en comparación con el GTa, GNBFa y GRNBF, en los cuales se observó un peso promedio ≤ 14.712 kg lechón⁻¹ (Tabla 3).

Para el caso del consumo de alimento comercial Total promedio lechón⁻¹, este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNEa (35.899 kg lechón⁻¹) y GRNE (36.969 kg lechón⁻¹) vs GTa, GNBFa y GRNBF, en los cuales los consumos de alimento fueron similares (≤ 26.445 kg lechón⁻¹). En cuanto al consumo promedio de nopal (BF o Extrusado) total lechón⁻¹ en la Etapa 2, en el

GNBFa fue de 3.343 kg lechón⁻¹ vs 545 g lechón⁻¹ en el GNEa; ambos promedios diferentes entre sí (p<0.05) (Tabla 3).

Tabla 3. Media de mínimos cuadrados para variables de crecimiento y consumos de alimento (comercial y nopal) de acuerdo con el SubGrupo

Variable	Etapa 2						
	GTa	GNBFa	GRNBF	GNEa	GRNE	±EE	Pr > t
Peso Inicial kg	10.422 ^b	10.475 ^b	10.337 ^b	12.262 ^a	13.510 ^a	0.42	0.001
Peso Final 3 ^a Sem kg	14.137 ^b	14.712 ^{bc}	14.150 ^b	17.062 ^{ac}	18.440 ^a	0.91	0.007
CA®/día kg	0.944 ^b	0.929 ^b	0.898 ^b	1.282 ^a	1.320 ^a	0.07	<.0001
CN*/día kg	0.000	0.119 ^a	0.000	0.019 ^b	0.000	0.005	<.0001
CA®T kg	26.445 ^b	26.032 ^b	25.154 ^b	35.899 ^a	36.969 ^a	1.82	0.001
CN*T kg	0.000	3.343 ^a	0.000	0.545 ^b	0.000	0.17	<.0001
Peso Final 6 ^a Sem kg	29.600	29.525	29.700	31.109	31.951	1.55	0.693
GPT	15.462	14.812	15.550	14.046	13.511	0.84	0.338
GDP kg	0.684	0.680	0.691	0.673	0.658	0.033	0.954
ICA	1.7 ^b	1.7 ^b	1.6 ^b	2.6 ^a	2.7 ^a	0.12	<.0001

GTa= SubGrupo testigo; GRNBF= SubGrupo retiro de nopal en base fresca; GNBFa= SubGrupo de nopal en BF; GNEa= SubGrupo de nopal extrusado; GRNE= SubGrupo de retiro de nopal extrusado; Sem= Semana; CA®= Consumo de alimento comercial; CN=Consumo de nopal; *= BF o extrusado; T= Total en la etapa; GPT= Ganancia de peso total en la Etapa; GDP= Ganancia diaria de peso; ICA= Índice conversión alimenticia.

El peso promedio de los lechones al finalizar la 6^{ta} semana de la fase de iniciación (≥ 29.525 kg lechón⁻¹), GPT (≥ 13.511 kg lechón⁻¹) y GDP (≥ 658 g día⁻¹ lechón⁻¹) fueron similares (p>0.05) en los cinco SubGrupos analizados en la Etapa 2 (Tabla 3; Figura 1). Finalmente, en el ICA se observó un mejor comportamiento (p<0.05) en el GTa, GNBFa y GRNBF (1.7, 1.7 y 1.6, respectivamente) vs GNEa y GRNE (2.6 y 2.7, respectivamente).

Discusión

El destete se considera uno de los periodos más críticos dentro de la producción porcina, puesto que existen diversos factores estresantes que resultan en una disminución del consumo de alimento y, por lo tanto, pérdida de peso de estos animales en los primeros días de la fase de iniciación (Zheng *et al.*, 2021). Por esta razón el control de los factores estresantes, como es el caso de la alimentación (alimento sólido) en esta etapa, es de gran importancia para disminuirlos (Loor, 2024).

De acuerdo con los resultados, el consumo de alimento fue afectado por el grupo en ambas etapas en donde los grupos a los que se les suministró extrusado de nopal en algún punto de la investigación tuvieron un mayor (p<0.05) consumo respecto a los demás grupos. Al respecto, Almeida *et al.* (2021) reportaron un peso para lechones en la Etapa 1 entre 408 y 429 g día⁻¹

lechón⁻¹, rango en el cual se encontró el peso de los lechones del GNE (Tabla, 2). Por otro lado, para la Etapa 2, Almeida *et al.* (2021) reportaron un consumo diario de alimento entre 797 y 845 g día⁻¹, el cual es menor a lo encontrado en este trabajo (Tabla 3). Posiblemente, esta diferencia se debió a al ambiente en donde se desarrollaron las investigaciones y en donde los factores, tales como: temperatura ambiental (Silva-Riofrío *et al.*, 2022), genotipo, tamaño y tipo de comedero, y densidad de animales en los corrales (Quiles y Hevia, 2008) afectan el consumo de alimento voluntario de los cerdos.

El mayor consumo de alimento de los grupos a los que se les adicionó extrusado de nopal, pudiera asociarse al efecto del ayuno (2 horas) establecido para que los lechones del GNE pudieran consumir el total de nopal extrusado ofrecido día⁻¹ lechón⁻¹. Puesto que, este fenómeno se ha observado en la investigación de Serrano *et al.* (2008) quienes encontraron que cerdos con una restricción de alimento y posterior acceso *ad libitum* comieron más (9%), crecieron más (20%) y tuvieron una mejor conversión alimenticia (13%)

Desde otro punto de vista, se ha establecido que los lechones presentan neofobia alimentaria y que provoca que disminuyan el consumo de alimento con dietas nuevas (Middelkoop *et al.*, 2020), que pudo suceder tanto con la adición de nopal en BF como con el extrusado de nopal. Sin embargo, el menor consumo de alimento del GNEBF puede deberse a que el nopal posee una alta cantidad de fibra que provoca la emulsificación del bolo alimenticio (Shoukat *et al.*, 2023), con esto, que su paso por el tracto gastrointestinal sea más lento y que la sensación de saciedad perdure por mayor tiempo (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021).

En relación con la ganancia de peso, Almeida *et al.* (2021) reportaron un rango de ganancia diaria de peso de 339-354 g para los primeros 14 días postdestete, y un rango de 631-670 g para el resto de la fase de iniciación (15-42 días). Dichos promedios fueron similares a los encontrados en este trabajo únicamente en la Etapa 2 (Tabla 3). En cuanto a la mayor ($p < 0.05$) ganancia de peso de los lechones del GNE en la Etapa 1 (Tabla 2, Figura 1), posiblemente se debido a la mayor cantidad de alimento que ingirió este grupo. Aspecto que no ocurrió en la Etapa 2, aun y cuando el GNEa y GRNE consumieron mayor cantidad de alimento. Aspecto que puede ser explicado por lo establecido por Kulmakova *et al.* (2021): “un mayor consumo de alimento no garantiza el aprovechamiento de este”. Por lo cual, es posible que los grupos con la adición de extrusado, al no modular los efectos de la inflamación intestinal provocados por el

estrés postdestete (Capítulo III, de esta investigación) no tuvieron las condiciones gastrointestinales necesarias para absorber los nutrientes del alimento total que ingirieron.

En lo que respecta al peso de los lechones, al finalizar la Etapa 1, este fue mayor ($p < 0.05$) en el GNE. Al respecto Rabelo-Ruiz *et al.* (2021) reportó un peso de 10.5 kg a los 14 días postdestete, resultado menor al GNE y similar al GT y GNBF (Tabla 2). El mayor consumo de alimento de del GNE, pudo estar determinado hasta cierto punto por los compuestos fenólicos contenidos en el nopal extrusado puesto que pudieron actuar en la reducción de citocinas proinflamatorias del intestino; aunque se debe aclarar que, este fenómeno fue con menor intensidad que en el GNBF (Capítulo II de esta investigación) y la primera semana postdestete. Sin embargo, el peso final de los lechones en la Etapa 2 (Tabla 3) fue similar en los cinco grupos evaluados ($p > 0.05$). Lo que podría sugerir que la propiedad del nopal en BF o extrusado es menor o ya no tienen efecto alguno. Aspecto que puede ser corroborado por lo señalado por Tang *et al.* (2022): “el proceso inflamatorio del sistema gastrointestinal del lechón tiene lugar únicamente en la primer semana postdestete”.

En cuanto al peso final a la 6^{ta} semana postdestete (42 días; Etapa 2), distintas investigaciones han reportado promedios que varían desde los 21 kg hasta los 27 kg (Rabelo-Ruiz *et al.*, 2021; Estrada, 2023). Resultados estos menores a los encontrados en esta investigación (Tabla 3). La diferencia entre los resultados de dichos investigadores y los de esta investigación puede deberse a distintos factores, tales como: el genotipo de los animales (Vashchenko *et al.*, 2023) y la densidad de animales por alojamiento, en esta investigación fue individual (jaulas individuales) y ello, evita que el cerdo gaste energía en otras actividades como peleas, interacción social; tal como lo reportan Bist *et al.* (2024).

Por último, respecto al índice de conversión alimenticia (ICA), Almeida *et al.* (2021) reportaron un ICA para la Etapa 1 (14 días postdestete) de 1.20-1.25, los cuales son menores a lo observado en esta investigación (Tabla 3); por otro lado, mismos autores, encontraron en la Etapa 2 (15-42 días postdestete) de 1.26-1.27, los cuales también difieren a lo encontrado en la investigación presente. Las diferencias entre investigaciones pueden ser provocadas por variaciones en los trabajos, como dietas (Balan *et al.*, 2020), factores ambientales (Hortenhuber *et al.*, 2020), genotipos (Homma *et al.*, 2021), entre otros. Este comportamiento puede ser posible a que, aunque los grupos con adición de extrusado tuvieron un mayor consumo de alimento, este no lo

absorbieron y aprovecharon en el tracto gastrointestinal como lo hicieron los otros grupos, y que la propiedad sobresaliente de este aditivo (extrusado) sea únicamente la actividad antiinflamatoria atribuida a los compuestos fenólicos y flavonoides, que tendría acción en la primer semana postdestete que es cuando la inflamación gastrointestinal se encuentra activa, y que por esta razón no se viera efecto en la segunda etapa experimental. Caso contrario al nopal en BF, al que se le han atribuido distintas propiedades como prebiótico (Coutiño-Laguna *et al.*, 2021), protector de mucosa (Prajapati y Apte, 2021), antiinflamatorio (Ferjani *et al.*, 2024), entre otras, las cuales pudieron seguir actuando durante el resto de la fase experimental y que tuvieron efectos benéficos.

Conclusión

La adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) mejora el consumo voluntario de alimento comercial y la ganancia diaria de peso en las primeras dos semanas de la fase de iniciación, sin mostrar mejoría en la conversión alimenticia. Sin embargo, después de los 14 días postdestete la ganancia de peso no muestra mejoría aun y cuando se mantiene la mejoría en el consumo voluntario de alimento comercial, lo cual repercute en un mayor índice de conversión alimenticia. Dicho comportamiento requiere de una mayor explicación, por lo que, es necesario replantear la investigación, en donde se incluya un mayor porcentaje de adición de nopal extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación.

Bibliografía

- Almeida L.M., Zavelinski V.A.B., Sonálio K.C., Fonseca S.K., Muramatsu K., Maiorka A. 2021. “Effect of feed particle size in pelleted diets on growth performance and digestibility of weaning piglets”. *Livestock Science*. 244: 104364.
- Balan P., Staincliffe M., Moughan P.J. 2020. “Effects of spray-dried animal plasma on the growth performance of weaned piglets-A review”. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 105(4): 699-714.
- Bist R.B., Bist K., Poudel S., Subedi D., Yang X., Paneru B., Mani S., Wang D., Chai L. 2024. “Sustainable poultry practices: a critical review of current strategies and future prospects”. *Poultry Science*. 103(12): 104295.
- Campoy GME., Martínez CM., Hernández GMA. 2019. “Producción y comercialización de carne porcina y ovicaprina, ¿cadena productiva o pervivencia de una necesidad vuelta tradición? Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México”. *Revista de El Colegio de San Luis*. Núm. 20. Pp. 191-214.

- Canibe N., Hojberg O., Kongsted H., Vodolazska D., Lauridsen C., Skau N.T., Schonhertz A.A. 2022. “Review on Preventive Measures to Reduce Post-Weaning Diarrhea in Piglets”. *Animals*. 12(19).
- Choton S., Gupta N., Bandral J.D., Anjum N., Choudary A. 2020. “Extrusion technology and its application in food processing: A review”. *The Pharma Innovation Journal*. 9(2): 162-168.
- Coutiño-Laguna B.C., Cruz-Requena M., Palomo-Ligas L., Segura-Almaraz K.L., Chávez-García S.N., Nery-Flores S.D., Rodríguez-Herrera, R. 2021. “*Opuntia* Fiber and Its Health-Related Beneficial Properties”. At *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*, 299-330.
- Das G., Lim KJ., Tantengco OAG., Carga HM., Goncalves S., Romano A., Kumar DS., Coy-Barrera E., Han-Seung S., Gutiérrez-Grijalva EP., Heredia JB., Kumar PJ. 2020. “Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”. *Phytotherapy Research*. Pp. 1-36.
- Elshehy H., Salah S., Abdel-Mawla E., Agamy N. 2020. “Protective Effect of *Opuntia ficus-indica* against Diabetes in Alloxan-induced Diabetic Rats”. *Canadian Journal of Clinical Nutrition*. 8(2): 20-34.
- Espejo-Beristain G., Paredes-Ramos P., Ahuja-Aguirre C., Carrasco-García AA., Naranjo-Chacón F. 2020. “Effect of environmental enrichment on performance of piglets during anxiety tests”. *Bio Ciencias*. 7: 1-21.
- Estrada GEG. 2023. “Evaluación del prebiótico MFeed con relación al desempeño productivo de lechones destetados”. Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.
- Ferjani W., Kouki A., Dang P.M.C., Fetoui H., Chtourou Y., Ghanem-Boughanmi N., Ben-Attia M., El-Benna J., Souli A. 2024. “*Opuntia ficus indica* cladodes extract inhibits human neutrophil pro-inflammatory functions and protects rats from acetic acid-induced ulcerative colitis”. *Inflammopharmacology*. 32: 3825-3844.
- Flores L., Elías A., Proaño F., Granizo G., Medina Y., López S., Herrera F., Caicedo W. 2015. “Effects of a microbial preparation, a probiotic and commercial antibiotic on the productive performance and pigs’ health in post-weaning period”. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 49(3): 357-365.
- Galvan-Aguilar M., Pérez-Sánchez R.E., Ortiz-Rodríguez R., Luna-Cruz A., Altamirano-Hernández J., Val-Arreola D. 2024. “Comparación de los valores de los compuestos bioactivos (fenoles y flavonoides totales) y actividad antioxidante del nopal (*Opuntia ficus indica*) verdura y forrajero postproceso de extrusión”. IV Foro Internacional Red IINOCA. 23-25 de octubre de 2024. Escobedo, Nuevo León.
- Gómez IE., Gómez-Raya L., Mercedes RW. 2022. “Control de la temperatura ambiental en lechones y cerdos de cebo”. *Ganadería*. Pp. 38-40.
- Homma C., Hirose K., Ito T., Kamikawa M., Toma S., Nikaido S., Satoh M., Uemoto Y. 2021. “Estimation of genetic parameter for feed efficiency and resilience traits in three pig breeds”. *Animal*. 15(11): 100384.

- Hortenhuber S.J., Schauburger G., Mikovits C., Schonhart M., Baumgartner J., Niebuhr K., Piringer M., Anders I., Andre K., Hening-Pauka I., Zollitsch W. 2020. “The effect of climate change-induced temperature increase on performance and environmental impact of intensive pig production systems”. *Sustainability*. 12(22): 9442.
- Ilchmann-Diounou H. y Menard S. “Psychological stress, intestinal barrier dysfunctions and autoimmune disorders: an overview”. *Frontiers in Immunology*. 11(1).
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico del Estado de Guanajuato. [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092146.pdf [Consulta septiembre 2024]
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo [En línea] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024]
- Kulmakova N., Magomadov T., Kostomakhin N., Semenov V., Mudarisov R. 2021. “Safety and quality of feed for piglets”. *IOP Conferences Series: Earth and Environmental Science*. 935.
- Littell R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. “Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures”. *Journal of Animal Science*. 76(1):1216- 1231.
- Loor SGL. 2024. “Estrategias de producción que permitan la reducción del uso de antibióticos en la alimentación de cerdos en crecimiento”. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador.
- Middelkoop A., Kemp B., Bolhuis E. 2020. “Early feeding experiences of piglets and their impact on novel environment behavior and food neophobia”. *Applied Animal Behavior Science*. 232: 105142.
- Ming D., Wang w., Huang C., Wang Z., Shi C., Ding J., Liu H., Wang F. 2021. “Effects of Weaning Age at 21 and 28 Days on Growth Performance, Intestinal Morphology and Redox Status in Piglets”. *Animals*. 11(8): 1-12.
- Monger X.C., Gilbert A.A., Saucier L., Vincent A.T. 2021. “Antibiotic Resistance: From Pig to Meat”. *Antibiotics*. 10(1): 1209.
- Morales R. 2023. “México bate récord en importaciones de carne de cerdo de Estados Unidos”. [En línea] <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-bate-record-en-importaciones-de-carne-de-cerdo-de-EU-20230908-0004.html> [Consulta 09 mayo 2024].
- Ortiz-Rodríguez R, Ordaz-Ochoa G, García-Saucedo PA, Pérez-Sánchez RE. 2021. “El nopal (*Opuntia ficus-indica*) como complemento de la dieta de cerdas lactantes sobre los niveles de glucosa sérica y consumo de alimento durante la fase de lactancia”. En: Portillo L., R. Soltero, A. L. Vigueras y R. de L. Romo (editores). *Opuntia: aportaciones a su conocimiento y aprovechamiento*. Universidad de Guadalajara, México. Pp. 58-64.

- Ortiz R.R., Ahumada G.J.T., Pérez S.R.E., García-Saucedo P.A., Martínez-Flores H.E., Val A.D. 2022.” Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times”. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24(1): 42-253.
- Osorio-Córdoba J., Pelayo-Zaldívar C., Verde-Calvo J.R., Ponce-Valadez M., Díaz de León-Sánchez F., Bosquez-Molina E., Rodríguez-Huenso M.E. 2011. “Conservación de nopal verdura Milpa Alta (*Opuntia ficus-indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10(1):93-104.
- Prajapati S.S. y Apte M. 2021. “Gums and Mucilage as multifunctional pharmaceutical agent”. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 13(2):2846.
- Patankar JV., Becker. 2020. “Cell death in the gut epithelium and implications for chronic inflammation”. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 17: 543-556.
- Pérez SI. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”. Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Quiles A., Hevia ML. 2008. “Factores que influyen en el consumo de pienso en los cerdos (I)”. *Producción Animal*. (248): 15-26.
- Rabelo-Ruiz M., Teso-Pérez C., Peralta-Sánchez J.M., Ariza J.J., Martín-Platero A.M., Casabuena-Rincón O., Vázquez-Chas P., Guillamón E., Aguinaga-Casañas M.A., Maqueda M., Valdivia E., Baños A., Martínez-Bueno M. 2021. “*Allium* extract implements weaned piglets’ productive parameters by modulating distal gut microbiota”. *Antibiotics*. 10(3): 269.
- Salvo-Romero E, Alonso-Cotoner C, Pardo-Camacho C, Casado-Bedmar M, Vicario M. 2015. “Función barrera intestinal y su implicación en enfermedades digestivas”. *Revista Española de Enfermedades Digestivas*. 107(11): 686-696.
- Serrano M.P., Valencia D.G., Lázaro R., González-Mateos G. 2008. “La restricción alimenticia como herramienta para cumplir con la norma para cerdos Ibéricos”. [En línea] https://www.3tres3.com/es-mx/articulos/la-restriccion-alimenticia-como-herramienta-para-cumplir-con-la-norma_1397/ [Consulta 15 diciembre 2024].
- Shoukat R., Cappai M., Pia G., Pilia L. 2023 “An updated review: *Opuntia ficus-indica* (OFI) chemistry and its diverse applications”. *Applied Sciences*. 13(1).
- Silva-Riofrío L., Silva-Paredes O., Lugo-Almarza M., Saquicela-Rojas R., Fonseca-Restrepo C., Angulo-Cubillán F. 2022. “Effect of water spray treatment controlled for environmental temperature on productivity and animal welfare in grow-finish pigs”. *Revista científica FCV-LUZ*. 32: 1-7.
- Tang X., Xiong K., Fang R., Li M. 2022. “Weaning stress and intestinal health of piglets: A review”. *Frontiers in Immunology*. 13: 1-14.
- Trindade S., Rouxinol M.I., Agulheiro-Santos A.C. 2023. “*Opuntia ficus-indica* L. Fruits Cold Storage Using Different Packaging Materials”. *Sustainability*. 15(14).

- Trolliet JC., Parsi JA., Milanesio L., Drvar FA., Morales CI. 2019. “Efectos del peso, número y uniformidad de grupo sobre la performance productiva de cerdos en post-destete en sistemas confinados”. *Revista Científica FAV-UNRC Ab Intus*. 4(2): 52-60.
- Van K.C., Turpin D., Michiels J., Pluske, J. 2023. “Reducing weaning stress in piglets by pre-weaning socialization and gradual separation from the sow: a review”. *Animals*. 13(10): 1644.
- Vargas L.B., Caldara F.R., Lippi I.C.C., Oliveira G.F., Odakura A.M., Burbarelli M.F.C., Garófallo G.R., Almeida P.I., Souza S.L. 2021. “Environmental enrichment strategies for weaned pigs: Welfare and behavior”. *Journal of Applied Animal Welfare Science*. 26(2).
- Vashchenko P.A., Zhukorskyi O.M., Saenko A.M., Khokhlov A.M., Usenko S.O., Kryhina N.V., Sukhno T.V., Tsereniuk O.M. 2023. “The influence of feeding level on the growth of pigs depending on their genotype”. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 14(1): 112-117.
- Zheng L., Duarte ME., Sevarolli LA., Sung WK. 2021. “Intestinal health of pigs upon weaning: challenges and nutritional intervention”. *Frontiers in Veterinary Science*. 8(12): 1-18.

Discusión General

Es un hecho que el estrés del destete en los lechones es una situación que se debe controlar y prevenir, de lo contrario, culminará con el retraso del crecimiento del lechón (Zheng *et al.*, 2021), por ello, es importante el estudio de estrategias que mitiguen los efectos del estrés postdestete (Canibe *et al.*, 2022). Al respecto, se han estudiado distintas estrategias, dentro de las cuales, el nopal como parte de la dieta es una opción viable, debido a su contenido en fibra y compuestos bioactivos como flavonoides y fenoles (Hernández-Becerra *et al.*, 2022) y que, por ello a esta cactácea se le atribuyen distintas propiedades: prebiótico, antioxidante, antiinflamatorio, hipoglucemiante, entre otras (Das *et al.*, 2020). Dichas propiedades solo se han podido verificar cuando la ingesta del nopal es en base fresca (Gaytán-Lemus *et al.*, 2018; Ordaz *et al.*, 2020); pero, no se cuenta con información cuando el nopal se procesa mediante la técnica del extracción.

De acuerdo con investigaciones con plantas que fueron sometidas a la extrusión estas pueden modificar sus componentes y propiedades que presentan en BF (Yi *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). En la presente investigación (Capítulo I), los componentes fisicoquímicos del nopal cambian con el proceso de extrusión: los niveles de fibra cruda disminuyen y la proteína cruda (PC) aumenta (Tabla 1, Capítulo I). Cambios que posiblemente se debieron a la temperatura de deshidratación a 50°C durante el proceso de extrusión. Se sugiere que este proceso promueve la ruptura de los componentes de la fibra y la convierte en carbohidratos digeribles (González, 2002). Por otro lado, el porcentaje de PC aumenta con el proceso de extrusión (Tabla 1; Capítulo I); al respecto, Wang *et al.* (2022) también observó un aumento en la PC en hojas de yuca post proceso de extrusión.

En cuanto a los cambios en los metabolitos secundarios (fenoles totales y flavonoides) y la actividad antioxidante del nopal expuesto al proceso de extrusión, estos se incrementan (Figura 1 y 2, Capítulo I), posiblemente debido a que la compresión mecánica durante dicho proceso puede romper las paredes celulares de las plantas y liberar los compuestos encapsulados (Navarro *et al.*, 2020) y permitir su liberación y disponibilidad, tanto para su medición como para incrementar la actividad antioxidante. Ante estos hallazgos, se sugiere que el proceso de extrusión mejora las cualidades nutrimentales y fitoquímicas de esta cactácea, por lo que se esperaría que su efecto al adicionarse en la dieta de lechones en iniciación fuera similar o mejor

que el nopal en BF. Sin embargo, los resultados del efecto de la adición de nopal extrusado a la dieta de lechones destetados no mostraron el comportamiento esperado.

En la presente investigación, se retó al extrusado de nopal frente al nopal en BF en cuanto a su efecto sobre la modulación de las citocinas proinflamatorias (IL-1 β , IL-12, TNF- α , entre otras) del intestino del lechón bajo estrés postdestete, puesto que los valores de las citocinas proinflamatorias son indicación del nivel de inflamación que se presenta en el organismo (Groot *et al.*, 2021). En este sentido, el efecto de la adición del nopal extrusado a la dieta de lechones en fase de iniciación mostró reducción de las concentraciones de las citocinas; pero, su efecto fue menor al nopal en BF, aunque mayor al grupo testigo ($p < 0.05$) (Figura 1, Capítulo II).

La diferencia en el efecto del nopal en BF y extrusado sobre citocinas proinflamatoria posiblemente se deba al proceso de extrusión y a al porcentaje de adición (0.1% con base al peso vivo del lechón) o a ambos factores. Para el primer caso, en esta investigación se encontró una mayor concentración de metabolitos secundarios en el extrusado. Sin embargo, Galván-Aguilar *et al.* (2024) reportó una tendencia a disminuir los flavonoides cuando el nopal se somete a proceso de extrusión. Por lo que posiblemente, el extrusado consumido por los lechones al contener menor concentración de flavonoides y compuestos fenólicos provocaron un menor efecto antiinflamatorio (Figura 1, Cap.2). Para el segundo caso, es posible que se requiera de incrementar el porcentaje de nopal extrusado a la dieta de los lechones para observar similar efecto al observado con la dieta de nopal en BF. Debido a esto, se sugiere seguir estudiando los niveles de inclusión de extrusado de nopal para poder observar los efectos deseados.

Por otro lado, el estrés postdestete también tiene implicaciones a nivel tisular, ya que rompe la integridad del epitelio intestinal (Tang *et al.*, 2022). En este sentido, la adición de nopal extrusado a lechones en iniciación no mostró mejorías en cuanto a las mediciones de vellosidades intestinales: largo y ancho de vellosidades, profundidad de criptas, relación Vellosidad:Cripta y área de absorción (Tabla 2, Figura 1; Capítulo III). Caso contrario en lechones que consumieron nopal en BF, estos sí mostraron mejorías en cuanto a las variables mencionadas. Aspecto que concuerda con los hallazgos de Gaitán-Lemus *et al.* (2018), en donde la adición de nopal en BF a cerdos en crecimiento (20-100 kg) mostró mayor ($p < 0.05$) longitud (altura) de vellosidades respecto al grupo testigo.

La mejoría de la integridad intestinal de los lechones que consumieron nopal en BF, podría deberse a la fibra soluble del nopal (mucílago y pectinas). A grandes rasgos, esta fibra es utilizada por la microbiota intestinal para su propia nutrición, y posteriormente la convierte en ácidos grasos de cadena corta (Wang *et al.*, 2019), y estos sirven como sustrato para las células del epitelio intestinal (Tanes *et al.*, 2021), lo que les ayuda a mantener sus funciones y, en consecuencia, la integridad del epitelio (Liu *et al.*, 2022). Por su parte, el mucílago de nopal es considerado como protector de mucosa gástrica (Prajapati y Apte, 2021), pues es capaz de reducir la presentación de úlceras tanto en el estómago como en la porción proximal del intestino delgado (duodeno) (Andrade y Tribuzy, 2023). Esto podría sugerir que el nopal en BF que consumieron los lechones, actuó como prebiótico, pero también como protector epitelial, lo que ayudó a mantener la integridad intestinal y reflejarse en los resultados observados (Tabla 2, Figura 1; Capítulo III). Por otro lado, se ha establecido que el mucílago deshidratado (similar a lo utilizado en esta investigación en el extrusado) cambia sus propiedades respecto al mucílago en base fresca, como por ejemplo la capacidad de reabsorción de agua (Quintero-García *et al.*, 2021), por lo que sería la razón de no encontrar los mismos efectos en el GNBF y GNE. Sin embargo, se sugiere seguir estudiando los porcentajes de inclusión de nopal extrusado a la dieta para lograr ver el efecto de la fibra soluble presente reflejado en la integridad intestinal.

Además de los efectos a nivel histológico y antiinflamatorios, también se ha establecido que el nopal disminuye los niveles de glucosa, colesterol y triglicéridos en sangre (Elshehy *et al.*, 2021). Aspecto que en la presente investigación no se pudo observar en el GNE. No obstante, el GNBF si mostró disminución de los niveles de glucosa sanguínea (Figura 1, Capítulo IV).

El efecto hipoglucemiante aún no se conoce de manera exacta, por un lado, se establece que la fibra del nopal, por su actividad emulsificante en el tracto gastrointestinal provoca el encapsulamiento de los compuestos del bolo alimenticio impidiendo su absorción en el intestino (Ahumada, 2021). Pero, por otro lado, la disminución de glucosa en sangre también se ha atribuido a otros compuestos como los flavonoides (Sok Yen *et al.*, 2021), los cuales se encuentran presentes en el nopal (Zeghibib *et al.*, 2022). En este aspecto, Moradi-Marjaneh *et al.* (2019) y Alqudah *et al.* (2024) sugieren que estos compuestos actúan en algún punto de las rutas metabólicas de la glucosa que no permiten su absorción.

Relacionado con lo expuesto en el párrafo anterior y con el que no se observara el efecto antiinflamatorio y antioxidante deseado del extrusado de nopal (Capítulo II), es posible que, efectivamente, el extrusado de nopal adicionado a los lechones contuviera menor cantidad de flavonoides y fenoles que el nopal en BF y que por esta razón, no existiera una disminución de glucosa; aunado a que el nopal en BF, a diferencia del extrusado, si posee mucílago fresco que permitiera el encapsulamiento del bolo alimenticio y así la absorción de componentes que provocan el aumento de los niveles de glucosa. Respecto a esto, si el porcentaje de inclusión del extrusado a la dieta fuera mayor podría observarse algún efecto hipoglucemiante.

En lo que respecta a los niveles de colesterol y triglicéridos no se observó efecto ($p>0.05$) de la dieta adicionada con nopal extrusado o nopal en BF (Figura 2 y 3; Capítulo IV). Aspecto que difiere de los resultados reportados en otras investigaciones respecto de dicho efecto (Ordaz *et al.*, 2020; Ahumada, 2021). Posiblemente ello se deba a que en la mayoría de las investigaciones, han utilizado animales en etapas de vida más avanzadas o en modelos biológicos que presentan alguna patología como obesidad y/o diabetes; caso contrario en la presente investigación: se evaluaron lechones en pleno desarrollo y, la dietas de estos contenían bajas proporciones de grasas y por ello, es posible que estos efectos no se vieran reflejados (Tabla 1, Capítulo IV); puesto que, las grasas incluidas en la dieta es utilizado para el crecimiento y desarrollo del lechón y no para su almacenamiento (Ruey-Chee, 2016).

Por último, en lo que respecta al consumo voluntario de alimento, ganancia de peso, peso y conversión alimenticia (Tabla 2 y 3; Capítulo V), en la información recopilada para la discusión de dichas variables existe una amplia variedad de resultados que dificulta la comparación entre ellos para lograr una discusión objetiva en torno a los resultados del efectos del nopal extrusado sobre las variables ya mencionadas. Sin embargo, en cuanto a los consumos de alimento en los primeros 14 días postdestete, el consumo promedio de alimento del grupo de lechones que consumió nopal extrusado se encuentra dentro del rango para lechones de esa edad (Almeida *et al.* (2021) (Tabla 2, Capítulo V); Para el caso del consumo promedio de alimento en lechones de la tercera a sexta semana de la fase de iniciación (Etapa 2), Almeida *et al.* (2021) reportaron un consumo diario de alimento entre 797 y 845 g; consumos menores a lo encontrado en la presente investigación (Tabla 3, Cap. 5)

El consumo voluntario de alimento animal⁻¹ es una variable cuyos resultados pueden estar afectados por múltiples factores y a ello se debe la diferencia de resultados entre investigaciones. Por ejemplo, el consumo de alimento se afecta por el ambiente en donde se desarrollaron las investigaciones y en donde los factores, tales como: temperatura ambiental (Silva-Riofrío *et al.*, 2022), genotipo (Águila, 2022), tamaño y tipo de comedero, y densidad de animales en los corrales (Quiles y Hevia, 2008) afectan los resultados del consumo de alimento voluntario de los cerdos. Un factor porco estudiado y que puede afectar el consumo voluntario de alimento es el ayuno, en este sentido, los lechones que consumieron nopal extrusado ayunaron (2 horas) y presentaron mayor consumo de alimento durante toda la fase experimental (Tabla 2 y 3, Capítulo V). Este fenómeno se ha observado en la investigación de Serrano *et al.* (2008) quienes encontraron que cerdos con una restricción de alimento y posterior acceso *ad libitum* comieron más (9%), crecieron más (20%) y tuvieron una mejor conversión alimenticia (13%)

Aunado a lo anteriormente descrito, el efecto antiinflamatorio de los flavonoides presentes en el extrusado, también pudieron afectar el consumo de alimento; puesto que, se ha establecido que la inflamación tiene efecto a nivel cerebral y en la sensación de hambre (Kuhla, 2020), así que, entre mayor grado de inflamación (mayor concentración de citocinas proinflamatorias) menor será el consumo de alimento, aspecto que se corroboró en la presente investigación (Figura 1, Tabla 3; Cap. 2). Por lo que es posible que el mayor consumo de alimento del grupo con adición de extrusado se deba a la reducción de citocinas que ocasionaron los flavonoides presentes en este, y que a diferencia del grupo con consumo de nopal en BF, no había consumo de mucílago que emulsificara el bolo alimenticio y ocasionara mayor tiempo de tránsito intestinal con sensación de saciedad por más tiempo.

Aun y cuando se observó un mayor ($p < 0.05$) consumo de alimento en el subgrupo con adición de nopal extrusado, la ganancia de peso de los lechones de este subgrupo fue similar ($p > 0.05$) al resto de los subgrupos evaluados en la etapa post-adaptación a la fase de iniciación (Tabla 3, Capítulo V), lo que indica que la digestión y absorción de alimento consumido lechón⁻¹ del subgrupo nopal extrusado no fueron adecuados en el tracto gastrointestinal durante dicha etapa; puesto que, el mayor consumo de alimento no garantiza el aprovechamiento de este (Kulmakova *et al.*, 2021). En este sentido, se pudo sugerir que la propiedad sobresaliente de nopal extrusado es únicamente la actividad antiinflamatoria y ello, solo en la primer semana postdestete. Caso

contrario al nopal en BF, al que se le han atribuido otras propiedades que pueden actuar en periodos posteriores a la inflamación intestinal.

Por otro lado, en cuanto al peso de los lechones, Rabelo-Ruiz *et al.* (2021) reportó un peso de 10.5 kg a los 14 días postdestete, el cual fue menor al observado en los lechones que consumieron nopal extrusado; pero, similar al de los lechones bajo la dieta adicionada con nopal en BF (Tabla 2, Capítulo V). Mientras que para el peso al final de la fase de iniciación, este es muy variable, pero el rango que se maneja es de 21 a 27 kg (Rabelo-Ruiz *et al.*, 2021; Estrada, 2023). Pesos estos que son inferiores a lo observado en esta investigación (Tabla 3, Figura 1; Capítulo V). Al respecto, ya se ha hecho mención que los valores promedio de los indicadores productivos puede variar por muchos factores, entre los que destacan: genotipo de los animales (Vashchenko *et al.*, 2023), factores ambientales, manejo y calidad de la alimentación (Balan *et al.*, 2020), alojamiento de los animales y densidad de animales por alojamiento (Bist *et al.*, 2024).

En la nutrición animal, un indicador esencial para medir la eficiencia del alimento es el índice de conversión alimenticia. Para Almeida *et al.* (2021), en los primeros 14 días postdestete dicho índice oscila entre 1.20 y 1.25, y de 15 a 42 días postdestete este se encuentra entre 1.26 y 1.27, valores menores a los encontrados en la presente investigación (Tabla 2 y 3, Capítulo V). Esta diferencia entre lo que se observó en esta investigación y lo reportado por Almeida *et al.* (2021), pueden ser debidas a la diferencia de: dietas (Balan *et al.*, 2020), ambientes (Hortenhuber *et al.*, 2020), genotipos (Homma *et al.*, 2021), entre otros más. En lo referente al mayor índice de conversión alimenticia observado en el grupo sometido a la dieta adicionada con nopal extrusado, como ya fue mencionado, puede deberse a que el extrusado de nopal tiene efecto únicamente sobre la inflamación y su relación con el consumo de alimento durante las primeras dos semanas postdestete. Sin embargo, el porcentaje de inclusión a la dieta (0.1%) puede no ser el adecuado para observar un mejor efecto durante toda la etapa de iniciación, por lo que se sugiere seguir estudiando distintos niveles de inclusión en lechones.

De acuerdo con todo lo anteriormente discutido en este apartado, la dieta adicionada con nopal, extrusado, aunque muestra ciertos beneficios para la salud y desarrollo del animal no provoca los mismos efectos que la dieta adicionada con nopal en BF; por lo que, es posible que la cantidad adicionada de nopal extrusado (0.1%) únicamente actúe sobre la inflamación intestinal.

Tesis de Maestría: “Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre citocinas proinflamatorias, integridad intestinal, metabolitos energéticos y productividad”

Por lo cual, se sugiere incrementar el porcentaje de inclusión de extrusado a la dieta, pues probablemente, de hacer esto, los demás componentes incluidos en el extrusado pueden ocasionar efectos benéficos en cuanto el sistema gastrointestinal.

Conclusión General

La adición de 0.1% de extrusado de nopal (*O. ficus-indica*) a la dieta de lechones (6-30 kg) aumenta el consumo voluntario de alimento al disminuir la inflamación intestinal, sin embargo, no tiene efecto sobre la integridad intestinal ni sobre los metabolitos energéticos (glucosa, colesterol, triglicéridos). Por lo que, el nopal extrusado al no modular los efectos del estrés postdestete sobre la integridad intestinal no permite que el alimento que consume el lechón postdestete sea aprovechado apropiadamente y ello, no beneficia a las variables productivas, tales como: ganancia de peso e índice de conversión alimenticia. En este sentido, es necesario evaluar varios niveles de inclusión de nopal extrusado a la dieta de lechones en la fase de iniciación para poder establecer con mayor precisión si la dieta adicionada con nopal extrusado tiene efecto sobre el sistema gastrointestinal y las variables productivas.

Bibliografía General

- Águila R. 2022. “Tabla de crecimiento de cerdos (1). Puntos críticos para la interpretación del peso: Edad”. <https://www.porcicultura.com/destacado/tablas-de-crecimiento-del-cerdo-1-puntos-criticos-para-la-interpretacion-del-peso-edad> [Consulta 6 enero 2025].
- Ahumada G.J.T. 2021. “Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cocido a la dieta de cerdas postparto sobre: perfil metabólico y consume voluntario de alimento”. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Almeida L.M., Zavelinski V.A.B., Sonálio K.C., Fonseca S.K., Muramatsu K., Maiorka A. 2021. “Effect of feed particle size in pelleted diets on growth performance and digestibility of weaning piglets”. *Livestock Science*. 244: 104364.
- Alqudah S.M., Hailat M., Zakaraya Z., Abu-Daya A.A., Abu-Assab M., Alarman S.M., Awad R.M., Hamad M.F., Vicas L.G., Abu-Dayyid W. 2024. “Impact of *Opuntia ficus-indica* juice and empagliflozin on glycemic control in rats”. *Current Issues in Molecular Biology*. 46: 12343-12353.
- Andrade V.E. y Tribuzy M.C.A. 2023. “Bioprospecting and potential of cactus mucilages: A bibliometric review”. *Food Chemistry*. 401(1).
- Balan P., Staincliffe M., Moughan P.J. 2020. “Effects of spray-dried animal plasma on the growth performance of weaned piglets-A review”. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 105(4): 699-714.
- Bist R.B., Bist K., Poudel S., Subedi D., Yang X., Paneru B., Mani S., Wang D., Chai L. 2024. “Sustainable poultry practices: a critical review of current strategies and future prospects”. *Poultry Science*. 103(12): 104295.
- Benítez-Meza A., Gómez-Gurrola A., Hernández-Ballesteros J., Navarrete-Méndez R., Moreno-Flores L. 2015. “Evaluación de parámetros productivos y económicos en la alimentación de porcinos en engorda”. *Abanico veterinario*. 5(3).
- Canibe N., Hojberg O., Kongsted H., Vodolazska D., Lauridsen C., Skau N.T., Schonhertz A.A. 2022. “Review on Preventive Measures to Reduce Post-Weaning Diarrhea in Piglets”. *Animals*. 12(19).
- Choudhury R., Middelkoop A., Boekhorst J., Gerrits W.J.J., Kemp B., Bolhuis J.E., Kleerebezem M. 2021. “Early life feeding accelerates gut microbiome maturation and suppresses acute post-weaning stress in piglets”. *Environmental Microbiology*. 23(11): 7201-7213.
- Choton S., Gupta N., Bandral J.D., Anjum N., Choudary A. 2020. “Extrusion technology and its application in food processing: A review”. *The Pharma Innovation Journal*. 9(2): 162-168.
- Consejo Mexicano de la Carne. 2023. “Compendio Estadístico 2023”. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2023/05/Compendio-Estadistico-2023_COMECARNE.pdf [Consulta 10 diciembre 2024]
- Das G., Lim K.J., Tantengco OAG., Carga HM., Goncalves S., Romano A., Kumar DS., Coy-Barrera E., Han-Seung S., Gutiérrez-Grijalva EP., Heredia JB., Kumar PJ. 2020.

- “Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”. *Phytotherapy Research*. 1-36.
- Elshehy H., Salah S., Abdel-Mawla E., Agamy N. 2020. “Protective Effect of *Opuntia ficus-indica* against Diabetes in Alloxan-induced Diabetic Rats”. *Canadian Journal of Clinical Nutrition*. 8(2):20-34.
- Estrada GEG. 2023. “Evaluación del prebiótico MFeed con relación al desempeño productivo de lechones destetados”. Tesis de Licenciatura. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.
- Gaitán-Lemus S.B., Ordaz-Ochoa G., Val-Arreola D., Martínez-Flores H.E., Ortiz-Rodríguez, R. 2018. “Diet supplemented with nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifies productive behavior and blood profile in pigs”. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 17(1): 39-50.
- Galvan-Aguilar M., Pérez-Sánchez R.E., Ortiz-Rodríguez R., Luna-Cruz A., Altamirano-Hernández J., Val-Arreola D. 2024. “Comparación de los valores de los compuestos bioactivos (fenoles y flavonoides totales) y actividad antioxidante del nopal (*Opuntia ficus-indica*) verdura y forrajero postproceso de extrusión”. IV Foro Internacional Red IINOCA. 23-25 de octubre de 2024. Escobedo, Nuevo León.
- Gómez TG, Rebollar RS, Hernández MJ, Guzmán SE. 2012. “Competitividad en la producción porcina de México y Estados Unidos”. *Comercio Exterior*: 36-45.
- González, O.Y.J. 2002. “Contenido de fibra cruda y fibra dietética en mezclas de cereal-leguminosa sometidas a germinación y tratamiento térmico”. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Groot N., Fariñas F., Cabrera-Gómez C.G., Pallares F.J., Ramis G. 2021. “Weaning causes a prolonged but transient change in immune gene expression in the intestine of piglets”. *Journal of Animal Science*. 99(4): 1-12.
- Hernández-Becerra E., Aguilera-Barreiro M.A., Contreras-Padilla M., Pérez-Torrero E., Rodríguez-García M.E. 2022. “Nopal cladodes (*Opuntia ficus-indica*): Nutritional properties and functional potential”. *Journal of Functional Foods*. 95: 105183.
- Homma C., Hirose K., Ito T., Kamikawa M., Toma S., Nikaido S., Satoh M., Uemoto Y. 2021. “Estimation of genetic parameter for feed efficiency and resilience traits in three pig breeds”. *Animal*. 15(11): 100384.
- Hortenhuber S.J., Schauburger G., Mikovits C., Schonhart M., Baumgartner J., Niebuhr K., Piringer M., Anders I., Andre K., Hening-Pauka I., Zollitsch W. 2020. “The effect of climate change-induced temperature increase on performance and environmental impact of intensive pig production systems”. *Sustainability*. 12(22): 9442.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico del Estado de Guanajuato. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092146.pdf [Consulta septiembre 2024]
- INEGI. 2017. Anuario estadístico del Estado de Michoacán de Ocampo. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/

- productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [Consulta septiembre 2024]
- Kuhla B. 2020. “Review: Pro-inflammatory cytokines and hypothalamic inflammation: implications for insufficient feed intake of transition dairy cows”. *Animal*. 14: 65-77.
- Kulmakova N., Magomadov T., Kostomakhin N., Semenov V., Mudarisov R. 2021. “Safety and quality of feed for piglets”. *IOP Conferences Series: Earth and Environmental Science*. 935.
- Littell R.C., Henry P.R., Ammerman C.B. 1998. “Statistical analysis of repeated measures data using 528 SAS procedures”. *Journal of Animal Science*. 76(1): 1216- 1231.
- Littell R.C., Stroup W.W., Freund J.R. 2022. SAS® for Linear Models Cary NC: SAS Institute Inc. USA, 4: 191-194.
- Liu J., Luo Y., Kong X., Yu B., Zheng P., Huang Z., Mao X., Yu J., Luo J., Yan H., He J. 2022. “Effects of dietary fiber on growth performance, nutrient digestibility and intestinal health in different pig breeds”. *Animals*. 12(23).
- Monger X.C., Gilbert A.A., Saucier L., Vincent A.T. 2021. “Antibiotic Resistance: From Pig to Meat”. *Antibiotics*. 10(1): 1209.
- Moradi-Marjaneh R., Paseban M., Sahebkar A. 2019. “Natural products with SGLT2 inhibitory activity: Possibilities of application for the treatment of diabetes”. *Phytotherapy Research*.
- Navarro-Valdez, K., Capillo-Herrera, N., Calixto-Cotos, M.R., Santisteban-Rojas, O. P. 2020. “Extracción y microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de *Oenocarpus bataua mart*”. *Scientia Agropecuaria*. 639: 547-554.
- Norma Oficial Mexicana NOM-033-ZOO-1995, Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres. <https://www.cuautitlan.unam.mx/descargas/cicuae/normas/Norma033.pdf> [Consulta mayo 2024]
- Ordaz G., Juárez A., Pérez R.E., Martínez H.E., Ortiz R. 2020. “Effects of *Opuntia ficus-indica* in the diet of primiparous sows on the metabolic profile during late gestation and lactation and feed intake during lactation”. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 00:1-12
- Ortiz-Rodríguez R. 2019. “Impacto de la gestión administrativa tradicional en las empresas porcinas del centro de México”. *Revista Científica del Instituto Iberoamericano de Desarrollo Empresarial*. 2(3): 111-133.
- Ortiz-Rodríguez, R., Ahumada-Garcini, J.T., Pérez-Sánchez, E.R., García-Saucedo, P.A., Martínez-Flores, H.E., Val-Arreola, D. 2022. “Evaluation of physicochemical changes of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) at different steam cooking times”. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 138: 242-253.
- Osorio-Córdoba J., Pelayo-Zaldívar C., Verde-Calvo J.R., Ponce-Valadez M., Díaz de León-Sánchez F., Bosquez-Molina E., Rodríguez-Huenso M.E. 2011. “Conservación de nopal verdura Milpa Alta (*Opuntia ficus-indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada”. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10(1): 93-104.

- Pérez SI. 2021. “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”. Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Prajapati S.S. y Apte M. 2021. “Gums and Mucilage as multifunctional pharmaceutical agent”. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 13(2):2846.
- Quiles A., Hevia M.L. 2008. “Factores que influyen en el consumo de pienso en los cerdos (I)”. *Producción Animal*. 2008(248): 15-26.
- Quintero-García M., Gutiérrez-Cortez E., Bah M., Rojas-Molina A., Cornejo-Villegas M.A., Del Real A., Rojas-Molina I. 2021. “Comparative Analysis of the chemical composition and physicochemical Properties of the mucilage extracted from fresh and dehydrated *Opuntia ficus indica* cladodes”. *Foods*. 10(9): 2137.
- Rabelo-Ruiz M., Teso-Pérez C., Peralta-Sánchez J.M., Ariza J.J., Martín-Platero A.M., Casabuena-Rincón O., Vázquez-Chas P., Guillamón E., Aguinaga-Casañas M.A., Maqueda M., Valdivia E., Baños A., Martínez-Bueno M. 2021. “*Allium* extract implements weaned piglets’ productive parameters by modulating distal gut microbiota”. *Antibiotics*. 10(3): 269.
- Ruey-Chee W. 2016. “Dietary fat preference and effects on performance of piglets at weaning”. *Asian-Australas Journal of Animal Science*. 30(6): 834-842.
- Serrano M.P., Valencia D.G., Lázaro R., González-Mateos G. 2008. “La restricción alimenticia como herramienta para cumplir con la norma para cerdos Ibéricos”. https://www.3tres3.com/es-mx/articulos/la-restriccion-alimenticia-como-herramienta-para-cumplir-con-la-norma_1397/ [Consulta 15 diciembre 2024].
- SIAP. 2022. “Escenario mensual de productos agroalimentarios. Carne de porcino” https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/732604/Carne_de_porcino_Mayo.pdf [Consulta 11 octubre 2022].
- Silva-Riofrío L., Silva-Paredes O., Lugo-Almarza M., Saquicela-Rojas R., Fonseca-Restrepo C., Angulo-Cubillán F. 2022. “Effect of water spray treatment controlled for environmental temperature on productivity and animal welfare in grow-finish pigs”. *Revista científica FCV-LUZ*. 32: 1-7.
- Sok Yen F., Shu Qin C., Tan S.X.S., Jia Y.P., Yi L.H., Darmarajan T., Gunasekaran B., Salvamani S. 2021. “Hypoglycemic effects of plant flavonoids: A review”. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2021(1).
- Tanes D., Bittinger K., Gao Y., Friedman E.S., Nessel L., Paladhi U.R., Chau L., Panfen E., Fischbach M.A., Braun J., Xavier R.J., Clish C.B., Li H., Bushman F.D., Lewis J.D., Wu G.D. 2021. “Role of dietary fiber in the recovery of the human gut microbiome and its metabolome”. *Cell Host & Microbiome*. 29(1): 394-407.
- Tang X., Xiong K., Fang R., Li M. 2022. “Weaning stress and intestinal health of piglets: A review”. *Frontiers in Immunology*. 13(1): 1-14.
- Trindade S., Rouxinol M.I., Agulheiro-Santos A.C. 2023. “*Opuntia ficus-indica* L. Fruits Cold Storage Using Different Packaging Materials”. *Sustainability*. 15(14).

- Vashchenko P.A., Zhukorskyi O.M., Saenko A.M., Khokhlov A.M., Usenko S.O., Kryhina N.V., Sukhno T.V., Tsereniuk O.M. 2023. “The influence of feeding level on the growth of pigs depending on their genotype”. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 14(1): 112-117.
- Wang M., Wichienchot S., He X., Fu X., Huang Q., Zhang B. 2019. “In vitro colonic fermentation of dietary fibers: Fermentation rate, short-chain fatty acid production and changes in microbiota”. *Trends in Food Science & Technology*. 88(1): 1-9.
- Wang M., Wang L., Tan X., Wang L., Xiong X., Wang Y., Wang Q., Yang H., Yin Y. 2022. “The developmental changes in intestinal epithelial cell proliferation, differentiation and shedding in weaning piglets”. *Animal Nutrition*. 9(1): 214-222.
- Yi C., Qiang N., Zhu H., Xiao Q., Li Z. 2022. “Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains”. *Food Research International*. 160: 111681.
- Zeghib W., Boudjouan F., Vasconcelos V., Lopez G. 2022. “Phenolic compounds’ occurrence in *Opuntia* species and their role in the inflammatory process: a review”. *Molecules*. 27(15): 4763.
- Zheng L., Duarte ME., Sevarolli LA., Sung WK. 2021. “Intestinal health of pigs upon weaning: challenges and nutritional intervention”. *Frontiers in Veterinary Science*. 8(12): 1-18.

Anexos



Página 1 of 130 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:429412392

Cyntia Michelle González Borja

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES (6-30 KG) SOBR

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:429412392

Fecha de entrega

12 feb 2025, 8:59 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 feb 2025, 9:03 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) EXTRUSADO A LA DIETA DE LECHONES (6....pdf

Tamaño de archivo

1.2 MB

111 Páginas

44,953 Palabras

236,341 Caracteres



Página 1 of 130 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:429412392

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas	
Título del trabajo	Efecto de la adición de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) extrusado a la dieta de lechones (6-30 kg) sobre citocinas proinflamatorias, integridad intestinal, metabolitos energéticos y productividad.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Cynthia Michelle González Borja	1637268K@umich.mx
Director	Rosa Elena Pérez Sánchez	rosa.perez@umich.mx
Codirector	Roy Ortiz Rodríguez	roy.ortiz@umich.mx
Coordinador del programa	Martha Elena Pedraza Santos	mae.ciencias.bioologicas@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	SI	Se utilizó el programa "DeepL Translate" para la traducción del resumen a inglés.
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Cynthia Michelle González [Firma]
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, 11 de febrero de 2025.