



---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO  
DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN  
Y SERVICIO EN ZOOTECNIA**

**POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL**

**EVALUACIÓN DEL ENSILADO DE NOPAL-TUNA-GRANO DE JAMAICA  
COMO ALIMENTO PARA BORREGOS EN ENGORDA**

**TESIS**

Que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA**

Presenta:

**FRANCISCO JAVIER CASTAÑEDA TRUJANO**

Bajo la supervisión de: **Luis Alberto Miranda Romero, Dr.**



Chapingo, Estado de México, marzo de 2024

---

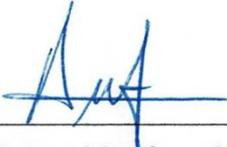
# Evaluación del ensilado de nopal-tuna-grano de jamaica como alimento para borregos en engorda

Tesis realizada por **FRANCISCO JAVIER CASTAÑEDA TRUJANO** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

## DOCTOR EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:   
Dr. Luis Alberto Miranda Romero

ASESOR:   
Dra. Deli Nazmín Tirado González

ASESOR:   
Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández

ASESOR:   
Dr. Ricardo D. Améndola Massiotti

LECTOR EXTERNO:   
Dr. Gustavo Tirado Estrada

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
ABREVIATURAS USADAS.....	vi
DEDICATORIAS .....	viii
AGRADECIMIENTOS .....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL .....	11
GENERAL ABS TRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	13
1.1. Literatura citada.....	16
2. NOPAL Y TUNA DE DESECHO, UNA ALTERNATIVA DE USO PARA LA PRODUCCIÓN PECUARIA .....	18
2.1. Producción de nopal de desecho en México .....	19
2.2. Alternativas de uso para los desechos de nopal y la tuna en la alimentación de rumiantes.....	20
2.3. Uso del nopal en la producción pecuaria en México .....	23
2.4. Perspectivas y líneas de interés para la investigación .....	25
2.5. Literatura consultada .....	25
3. PRODUCCIÓN Y ESTRATEGIAS PARA EL USO DE <i>OPUNTIA SPP.</i> Y SUS DERIVADOS EN LA ALIMENTACIÓN DE ANIMALES.....	26
3.1. Resumen .....	26
3.2. Abstract .....	27
3.3. Introducción.....	28
3.4. Métodos.....	29
3.4.1. Criterios de inclusión y exclusión de los artículos .....	29
3.4.2. Análisis bibliométrico .....	30

3.5. Producción de nopal y tuna .....	33
3.6. Usos del nopal.....	35
3.6.1. Otros usos del nopal en México.....	37
3.6.2. Desperdicio del nopal .....	38
3.7. Integración del nopal en la producción pecuaria .....	39
3.7.1. Estrategias para el uso del nopal en la alimentación animal .....	42
3.8. Conclusiones.....	43
3.9. Literatura citada.....	44
4. GAS PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL IMPACT INDICATORS FROM <i>IN VITRO</i> FERMENTATION OF DIETS WITH NOPAL SILAGE ( <i>OPUNTIA FICUS-INDICA</i> L.).....	50
Introduction.....	51
Materials and methods.....	52
Model .....	54
Results and discussion .....	54
Conclusions.....	57
References.....	57
5. INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL, SELECTIVIDAD Y DIGESTIBILIDAD DE DIETAS POR BORREGOS .....	60
5.1. Resumen .....	60
5.2. Abstract .....	61
5.3. Abreviaturas .....	62
5.4. Introducción.....	62
5.5. Material y métodos .....	64
5.5.1. Localización .....	64
5.5.2. Tratamientos y manejo animal .....	64
5.5.3. Fermentación <i>in vitro</i> de alimento ofrecido, rechazo y heces .....	64

5.5.4. Asimilación de la fracción fermentable.....	65
5.5.5. Indicadores de impacto ambiental y digestibilidad <i>in vivo</i> a 24 h de incubación.....	66
5.5.6. Digestibilidad aparente del alimento .....	67
5.5.7. Análisis estadístico .....	68
5.6. Resultados y Discusión .....	69
5.6.1. Análisis de varianza y media diferencia significativa.....	69
5.6.2. Correlaciones de Pearson .....	74
5.7. Conclusiones.....	76
5.8. Literatura citada.....	77
<b>6. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE OVINOS ALIMENTADOS CON ENSILADO DE NOPAL (<i>OPUNTIA SPP</i>) Y JAMAICA (<i>HIBISCUS SABDARIFFA</i>) .....</b>	<b>82</b>
6.1. Resumen .....	82
6.2. Introducción.....	84
6.3. Material y métodos .....	85
6.3.1. Localización .....	85
6.3.2. Elaboración de los ensilados .....	85
6.3.3. Tratamientos y manejo animal .....	86
6.3.4. Variables de comportamiento productivo.....	87
6.3.5. Análisis estadístico .....	88
6.4. Resultados y discusión.....	89
6.5. Conclusiones.....	94
6.6. Literatura citada.....	94

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Contenido nutricional de diferentes variedades de nopal. ....	23
<b>Cuadro 2.</b> Composición nutricional y capacidad de fermentación de cladodios de diferentes variedades de nopal. ....	41
<b>Cuadro 3.</b> Consumo y ganancia de peso en ovinos con dietas que incluyen nopal. ....	43
<b>Cuadro 4.</b> Composición de ingredientes y nutrimentos de dietas sin ensilado (DSE), con ensilado de maíz (DEM) y con 10 o 20 % ensilado de nopal (DEN10 y DEN20) para engorda de borregos. ....	65
<b>Cuadro 5.</b> Efecto de la dieta y el período de engorda de borregos en el consumo, digestibilidad aparente (DigA) e indicador de selectividad de la fracción fermentable (ISFF). ....	71
<b>Cuadro 6.</b> Efecto de la dieta en la asimilación de la fracción fermentable selectividad e indicadores de impacto ambiental. ....	72
<b>Cuadro 7.</b> Comportamiento de las variables in vitro e in vivo con respecto al tiempo de engorda. ....	75
<b>Cuadro 8.</b> Correlaciones entre las variables del cálculo de índice potencial de calentamiento global con la TPG con las variables in vivo. ....	76
<b>Cuadro 9.</b> Medias de los factores independientes analizados a través del tiempo para los parámetros productivos de ovinos alimentados con ensilado compuesto de nopal - tuna - grano de jamaica. ....	93

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Desecho de nopal y tuna derivado de las labores culturales, aprovechable para la producción animal.....	20
<b>Figura 2</b> Dinámica de publicación científica sobre el nopal en la nutrición animal. ....	21
<b>Figura 3</b> Producción científica sobre el nopal por área temática.....	21
<b>Figura 4</b> Elaboración de ensilados de nopal, con productores de la región de Otumba, Estado de México.....	22
<b>Figura 5</b> Dietas integrales para borregos en engorda con ensilado de nopal. .	22
<b>Figura 6</b> Ensilado de nopal a pequeña escala con tambos de plástico de 200 litros. ....	24
<b>Figura 7</b> Desperdicio y contaminación de parcelas a causa de nopal maduro y tuna no comercializada. ....	24
<b>Figura 8.</b> Documentos publicados anualmente sobre uso del nopal en la nutrición de animales en el período de 1984 a 2021.....	30
<b>Figura 9.</b> Clasificación por tipo de documento publicados. ....	31
<b>Figura 10.</b> Distribución de los documentos publicados por área temática.....	32
<b>Figura 11.</b> Número de documentos publicados por país de origen de la investigación. ....	32

## ABREVIATURAS USADAS

CA	Conversión alimenticia
CE	Cenizas
CIAc	Consumo diario de cenizas insolubles en ácido
CIAe	Cenizas en heces
CMS	Consumo de materia seca
CO <sub>2</sub> eq	Equivalente de CO <sub>2</sub>
CSD	Corn silage diet
DEM	Dieta con ensilado de maíz
DEN 10	Dieta con ensilado de nopal al 10 %
DEN 20	Dieta con ensilado de nopal al 20 %
DIGA	Digestibilidad aparente
DIVMS	Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca
DMS	Digestibilidad de la materia seca
DSE	Dieta sin ensilado (Testigo)
EII	Environment impact indicator
EM	Energía metabolizable
FDA	Fibra detergente ácido
FDN	Fibra detergente neutro
FFF	Fast fermentable fraction
FFL	Fracción fermentable lenta
FFM	Fracción fermentable media
FFR	Fracción fermentable rápida
FFT	Fracción fermentable total
GDP	Ganancia diaria de peso
GEI	Gases de efecto invernadero
GGWPI	Global warming potential index
GM	Gases menores
GP	Ganancia de peso
GWPI	Global warming potential indicator
HFC	Hidrofluorocarbonos
IIA	Indicador de impacto ambiental
IPCG	Índice potencial de calentamiento global
IS	Índice de selectividad
L	Fase lag

MFF	Medium fermentable fraction
MS	Materia seca
MSAO	Materia seca alimento ofrecido
MSAR	Materia seca alimento rechazado
MSH	Materia seca heces
PC	Proteína cruda
PFC	Perfluorocarbonos
PG	Producción de gas, Gas production
Phe	Producción de heces
PV	Peso vivo
S	Tasa de acumulación de gas
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre
SFF	Slow fermentable fraction
SIV	Selectividad <i>in vitro</i>
TFF	Total fermentable fraction
TPG	Técnica de producción de gas <i>in vitro</i>
VAO	Volumen máximo de alimento ofrecido
VAR	Volumen máximo de alimento rechazado
VH	Volumen máximo de heces
VM	Volumen máximo producido de gas
VOLT	Volumen total

## DEDICATORIAS

Este trabajo representa tiempo de estudio, investigación, representa también esfuerzo, dedicación y constancia, por esto se lo dedico:

A **Jime**, mi esposa, quien desde el inicio de esta aventura ha estado junto a mí, brindándome su apoyo, motivación y amor, gracias por inspirarme y por ayudarme a ser mejor persona TE AMO.

A **Ana Lilia Trujano Flores** y **Javier Castañeda Mares** mis padres, quienes siempre han creído en mí, no tengo forma de agradecerles ni de regresarles lo mucho que me han dado.

A **Gaby**, **Santi** y **Mateo**, por el cariño y el apoyo que siempre me han brindado, gracias también por los ratos de juego y diversión que hemos compartido.

Con cariño

*Francisco*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo al otorgarme la beca para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, a través del Posgrado en Producción Animal del Departamento de Zootecnia por brindarme la oportunidad de cumplir este objetivo profesional.

Al Dr. Luis Alberto Miranda Romero, por el apoyo, las enseñanzas, los consejos y la motivación para realizar la investigación.

A la Dra. Deli Nazmín Tirado González, por su incondicional apoyo con el análisis e interpretación de los datos y por la ayuda en corrección de la redacción de los artículos.

A mis asesores: Dr. Ricardo D. Améndola Massiotti y Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández por tiempo, esfuerzo y sugerencias, brindadas al presente documento.

A los profesores del Posgrado en Producción Animal, por los invaluable conocimientos que me proporcionaron para mi formación profesional.

A Laura y Carmen por su amistad y apoyo brindado dentro del Laboratorio de Microbiología Pecuaria para la realización de los análisis.

A mis compañeros y amigos, Citla, Orlando, Nancy, Rodrigo, Rosalba, Marisol, Vielka, Blanca, Migue, Memo, por lo buenos momentos y las aventuras que hemos disfrutado.

## DATOS BIOGRÁFICOS



### Datos personales

Nombre	Francisco Javier Castañeda Trujano
Fecha de nacimiento	27 de junio de 1991
Lugar de nacimiento	Ciudad de México
CURP	CATF910627HDFSRR03
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	10157446

### Desarrollo académico

Licenciatura (2011 - 2015)	DEIS en Zootecnia. Universidad Autónoma Chapingo.
Maestría (2018 - 2019)	DEIS en Zootecnia. Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo.
Doctorado (2019 - 2023)	DEIS en Zootecnia. Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo.

## RESUMEN GENERAL

### EVALUACIÓN DEL ENSILADO DE NOPAL-TUNA-GRANO DE JAMAICA COMO ALIMENTO PARA BORREGOS EN ENGORDA

El nopal es un recurso con potencial para la alimentación de ovinos; sin embargo, el alto contenido de humedad y sus características nutricionales no lo hacen adecuado para cubrir los requerimientos nutricionales de los ovinos, por lo que es necesario combinarlo con ingredientes que aporten energía y proteína. El objetivo de la investigación fue evaluar el potencial del ensilado de nopal-tuna-grano de jamaica en la alimentación de borregos y analizar la relación entre los indicadores de impacto ambiental *in vitro* e *in vivo* y el índice de selectividad del alimento. Para documentar la importancia del nopal para la alimentación de animales, se realizó una revisión de la literatura científica, identificando alternativas para el enriquecimiento del ensilado de nopal con subproductos agrícolas. Para ello se alimentaron borregos con cuatro dietas; sin ensilado (DSE; testigo); con 10 % de ensilado de maíz (DEM); y con 10 o 20 % de ensilado de nopal (DEN10 y DEN20). Se encontraron diferencias en el peso final para DSE Y DEN20 (3.81 kg,  $P < 0.05$ ), siendo mayor el consumo de materia seca para DSE ( $P < 0.03$ ). Usando la técnica de producción de gas *in vitro* se determinaron diferentes indicadores de contaminación y el comportamiento de la dieta *in vivo* e *in vitro*. También se observó una interacción dieta\*periodo para digestibilidad aparente (DigA) y el índice de selección de la fracción fermentable (ISFF;  $P < 0.01$ ), también, se observó que el índice potencial de calentamiento global (IPCG) fue 37% menor para DEN20 que para DSE ( $P < 0.05$ ). Se concluye que la inclusión de ensilado compuesto de nopal – tuna – grano de jamaica, en una dieta integral, no muestra desventajas en la producción animal, además, reduce la producción de gases de efecto invernadero disminuyendo la contaminación ambiental.

**Palabras clave:** alimentación, ensilaje, subproductos agrícolas.

## GENERAL ABSTRACT

### EVALUATION OF CACTUS-PRICKLY PEAR-HIBISCUS GRAIN SILAGE AS FEED FOR FATTENING LAMBS

The cactus is a resource with potential for sheep feeding; however, its high moisture content and nutritional characteristics do not make it suitable to achieve sheep's nutritional requirements, so combining it with ingredients that provide energy and protein is necessary. The objective of the research was to evaluate the potential of cactus-prickly pear-hibiscus grain silage in sheep feeding and to analyze the relationship between *in vitro* and *in vivo* environmental impact indicators and the feed selectivity index. Scientific literature was reviewed to document the importance of cactus for animal feeding and identify alternatives for enriching of cactus silage with agricultural by-products. For this purpose, sheep were fed four diets: without silage (DSE; control), with 10 % corn silage (DEM), and with 10 or 20 % cactus silage (DEN10 and DEN20). Differences were found in the final weight for DSE and DEN20 (3.81 kg,  $P<0.05$ ), with higher dry matter intake for DSE ( $P<0.03$ ). Using the *in vitro* gas production technique, different contamination indicators and *in vivo* and *in vitro* diet performance were determined. A diet\*period interaction was observed for apparent digestibility (DigA) and the fermentable fraction selection index (FFSI;  $P<0.01$ ). Also, it was observed that the global warming potential index (GWPI) was 37% lower for DEN20 than for DSE ( $P<0.05$ ). It is concluded that the inclusion of silage composed of cactus-prickly pear-hibiscus grain in an integral diet does not show disadvantages in animal production; it also reduces the production of greenhouse gases, decreasing environmental pollution.

**Key words:** feeding, silage, agricultural by-products.

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El nopal es un recurso con potencial agrotecnológico alto, como alimento fresco o procesado o como elemento base para humanos, animales y la medicina (Aguilar et al., 2008). Las variedades de nopal producidas comercialmente, difieren en la forma de los cladodios, presencia o ausencia de espinas, tamaño de los frutos, su color y composición nutrimental (Sepúlveda et al., 2007). La poda de cladodios en los sistemas de producción intensiva de nopal verdura y tuna, es una práctica rutinaria, con fines sanitarios, arquitectónicos y para estimular el rebrote de la penca, que genera grandes cantidades de residuos orgánicos, ricos en minerales (Torres, 2010) que al dejarlos descomponerse en el campo liberan P, Ca, Mg, K, Na, Cu entre otros; con lo que contamina suelo y aguas subterráneas poco profundas (Lozano-Rivas, 2012). Las descomposiciones anaeróbica y aeróbica de dichos residuos libera CH<sub>4</sub> u óxidos de nitrógeno, respectivamente (Kiss & Encarnación, 2006), gases de efecto invernadero con mayor impacto en el calentamiento global que el CO<sub>2</sub> (25 y 298 más; Maqueda González et al., 2005; Rojas-Valencia, 2011). La descomposición de los desechos de nopal y tuna también ocasionan plagas y enfermedades que afectan a los mismos cultivos de nopal y a los humanos (Altieri & Nicholls, 1994).

México es de los países principales productores de nopal y tuna, sin embargo, no toda la producción se logra comercializar, pues se estima que anualmente se desechan 83,784 t de nopal verdura y 10 t ha<sup>-1</sup> de nopal maduro, derivado de la poda por manejo de cultivo (Aranda, Segundo, Flores, & Cruz, 2008) REVISAR MANUAL. La acumulación y mal manejo de estos residuos orgánicos del nopal trae consigo un impacto negativo en el ambiente el cual no ha sido cuantificado (Yepes, Montoya, & Orozco, 2008),.

Existen alternativas de manejo de los desechos orgánicos, como el compostaje, para reducir su impacto ambiental y obtener abono para la nutrición de plantas o como sustrato para la obtención de biogás (Cardona-Alzate, Sánchez-Toro, Ramírez-Arango, & Alzate-Ramírez, 2004; Tavares, Salinas, & Galicia, 2009). La

MS de los cladodios tiene 80 % de materia orgánica y una digestibilidad de 60 %, potencialmente aprovechable como alimento para animales. La inclusión de 15 a 30 % de nopal en una dieta para ganado ha mostrado disminuir los costos de producción de carne entre 48 a 65 % (Aranda et al., 2008).

Tecnologías han sido investigadas para integrar los cladodios a dietas para rumiantes como: elaboración y formulación de bloques multinutricionales (Mejía-Haro, Delgado-Hernández, Guajardo-Hernández y Valencia-Pozada, 2011), deshidratación y molido del cladodios (Díaz-Ayala, Álvarez-García & Sima-Moo, 2015), fermentación sólida y semisólida (Pandey, 2003) y, ensilado (Vázquez-Mendoza, 2016).

El grano de jamaica es un residuo de cosecha, con concentraciones altas de materia seca y proteína, con valores de 92.5, 20.5 %, respectivamente (Jínez, Cortes, Ávila, Casaubon & Salcedo, 1998), haciéndola un ingrediente potencial para el uso en la alimentación de rumiantes.

La inclusión de jamaica al ensilaje de tuna y nopal puede ser útil para regular la humedad y balancear la composición nutricional, con el fin de obtener un ensilado de alta calidad fermentativa y nutritiva. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la respuesta productiva de borregos en engorda al incluir ensilado de nopal – tuna – grano de jamaica en la dieta.

Para alcanzar este objetivo el presente documento está conformado por seis capítulos; en el Capítulo II se expone un artículo de divulgación, enviado a la revista Internacional Universo Agroalimentario, con la finalidad de dar a conocer la importancia de los subproductos agrícolas del nopal y la jamaica en la alimentación de animales, así como el valor agregado que se les puede proporcionar a los subproductos agrícolas al transformarlos en alimento de calidad para rumiantes.

En el Capítulo III se presenta una revisión de literatura con el título Producción y estrategias para el uso de *Opuntia spp.* y sus derivados en la alimentación de

animales, con el objetivo de analizar los documentos publicados relacionados al uso de nopal en la alimentación de animales, así como de explorar los usos convencionales y no convencionales del nopal y tuna.

En el Capítulo IV, se reporta el resultado de utilizar la técnica de producción de gas *in vitro* en cuatro dietas isoenergéticas e isoprotéicas que fueron ofrecidas a borregos en engorda, se evaluó el índice potencial de calentamiento, así como el indicador de impacto ambiental que genera el uso de ensilado de nopal – tuna – grano de jamaica – paja de avena en una dieta de engorda de borregos.

El Capítulo V expone los resultados de los análisis de los indicadores de impacto ambiental y selectividad *in vitro* de dietas con ensilado de nopal, en donde se tenían borregos en engorda con cuatro dietas, en las cuales se calcularon los indicadores de selectividad del alimento y se estimó la asimilación de la fracción fermentable, así como la digestibilidad de la materia seca de las dietas.

El Capítulo VI presenta resultados de la prueba de comportamiento de ovinos, con el propósito de evaluar el potencial del ensilado de nopal – tuna – grano de jamaica, incluido en una ración integral, en donde se evaluó el consumo de materia seca, ganancia de peso en periodos de 15 días, ganancia de peso diaria y la conversión alimenticia. Con esto se ayuda a evaluar el potencial uso del ensilado compuesto de nopal para la alimentación de ovinos.

## 1.1. LITERATURA CITADA

- Aguilar, C. N., Rodríguez, H. R., Saucedo, P. S., & Jasso, C. D. (2008). In Fitoquímicos Sobresalientes del Semidesierto mexicano: de la planta a los químicos naturales y a la biotecnología. Editorial: Universidad Autónoma de Coahuila. 16ágs.: 161-177. I.S.B.N: 978-968-6628-760. México.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (1994). Biodiversity and pest management in agroecosystems. In Biodiversity and pest management in agroecosystems CRC Press, Second edition, Boca Ratón, pp 152.
- Aranda O., G., Flores V. C. A., & Cruz, M. F. M. (2008). Inclusion of cactus pear cladodes in diets for finishing lambs in Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 12: pp 49 – 55.
- Cardona-Alzate, C. A., Sánchez-Toro, O. J., Ramírez-Arango, J. A., & Alzate-Ramírez, L. E. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2: 78–89.
- Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 7. <http://www.medigraphic.com/pdfs/vetmex/vm-1998/vm981f.pdf>
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica* 79, 39–40.
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Uso de Extracto de Fique (*Furcraea* sp.) como Coadyuvante de Coagulación en Tratamientos de Lixiviados. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28, 219–227.
- Maqueda González, M. R., Carbonell Padrino, M. V., Ramírez Martínez, E., & García Flórez, M. (2005). Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, (2) 14–18.
- Mejía-Haro, J., Delgado-Hernández, J. L., Mejía Haro, I., Guajardo-Hernández, I., & Valencia-Posadas, M. (2011). Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21, 11–16.
- Rojas-Valencia, M. N. (2011). Manejo Integral de Residuos Sólidos, impacto ambiental y costos. *Ingeniería Civil*, 477, 12–16.

- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68, 534–545.
- Torres, S. A. (2010). Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes. IX Simposium-Taller Internacional de Producción y Aprovechamiento Del Nopal y El Maguey Nuevo León, Monterrey.
- Vázquez, G. M., Guitierrez E. A., Tavares, C. M. E., Salinas, C. E., & Galicia, V. S. (2009). Elaboración de composta orgánica para productores de nopal, como alternativa para el cuidado del ambiente. *Revista Arbitradas*, 7, 3–9.
- Vázquez-Mendoza, P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, pp 109.
- Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431.

## **2. NOPAL Y TUNA DE DESECHO, UNA ALTERNATIVA DE USO PARA LA PRODUCCIÓN PECUARIA**

Francisco Javier Castañeda-Trujano<sup>1</sup>, Luis Alberto Miranda-Romero<sup>1</sup>, Deli Nazmín Tirado-González<sup>2</sup>, Jimena Achiquen-Millán<sup>3</sup>, Griselda Chávez-Aguilar<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera federal México-Texcoco Km 38.5, C.P. 56230., Chapingo, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL), Tecnológico Nacional de México (TecNM). Km 18, Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, C.P. 20330. El Llano, Aguascalientes, México.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Blvr. Delta-Oaxaca S/N, C.P. 21705, Ejido Nuevo León, valle de Mexicali Baja California, México.

<sup>4</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Agricultura Familiar (CENID AF), Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 8.5, Carretera Ojuelos-Lagos de Moreno, C.P. 47540. Ojuelos de Jalisco, Jal., México.

\*Autor para correspondencia: [chavez.griselda@inifap.gob.mx](mailto:chavez.griselda@inifap.gob.mx)

**Artículo enviado a la Revista Digital Internacional Universo Agroalimentario**

# Nopal y tuna de desecho, una alternativa de uso para la producción pecuaria

Francisco Javier Castañeda-Trujano<sup>1</sup>, Luis Alberto Miranda-Romero<sup>1</sup>, Deli Nazmín Tirado-González<sup>2</sup>, Jimena Achiquen-Millán<sup>3</sup>, Griselda Chávez-Aguilar<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera federal México-Texcoco Km 38.5, C.P. 56230., Chapingo, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes (ITEL), Tecnológico Nacional de México (TecNM). Km 18, Carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, C.P. 20330. El Llano, Aguascalientes, México.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Blvr. Delta-Oaxaca S/N, C.P. 21705, Ejido Nuevo León, valle de Mexicali Baja California, México.

<sup>4</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Agricultura Familiar (CENID AF), Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 8.5, Carretera Ojuelos-Lagos de Moreno, C.P. 47540. Ojuelos de Jalisco, Jal., México.

\*Autor para correspondencia: [chavez.griselda@inifap.gob.mx](mailto:chavez.griselda@inifap.gob.mx)

## 2.1. PRODUCCIÓN DE NOPAL DE DESECHO EN MÉXICO

El nopal (*Opuntia* sp.) es una cactácea endémica de América de las cuales 258 especies han sido identificadas, encontrando a 100 de ellas en México (Rodríguez et al., 2009). El nopal es cultivado con diferentes propósitos en diversas regiones del mundo; en Italia para la producción de tuna destinada al consumo humano, en Brasil y en el norte de México se cultiva como forraje donde se producen hasta 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca (MS). En México también existe la producción intensiva y semintensiva de tuna y nopal verdura las cuales son de importancia económica, por lo que se destinan 12,630 ha al cultivo de nopal para verdura, con una producción anual de 796,953 t (SIAP, 2023). La poda de cladodios maduros y enfermos es una labor cultural anual cuyo objetivo es estimular la producción, facilitar la cosecha y mantener la sanidad del cultivo. Estos cladodios junto con la producción de nopal verdura que no se logra comercializar, estimada en 83,784 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia fresca, son desechados a los costados de los campos de cultivo (Figura 1) donde se descomponen causando: 1) liberación de minerales como P, Ca, Mg, K, Na y Cu, y la contaminación del suelo y aguas subterráneas poco profundas; 2) la emisión de metano (CH<sub>4</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) derivados, respectivamente, de la fermentación anaerobia y descomposición aeróbica de la materia orgánica de los cladodios, los cuales por ser gases de efecto invernadero tienen un fuerte impacto en el calentamiento global; 3) ocasionan plagas y enfermedades que afectan a los mismos cultivos de nopal y a los humanos (Monter-Arciniega et al., 2019).

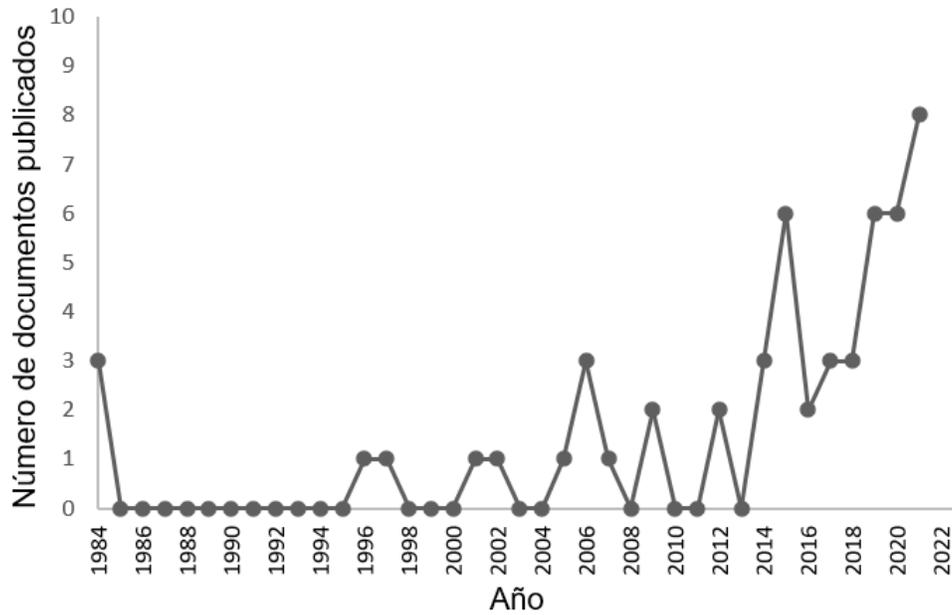


**Figura 1** Desecho de nopal y tuna derivado de las labores culturales, aprovechable para la producción animal.

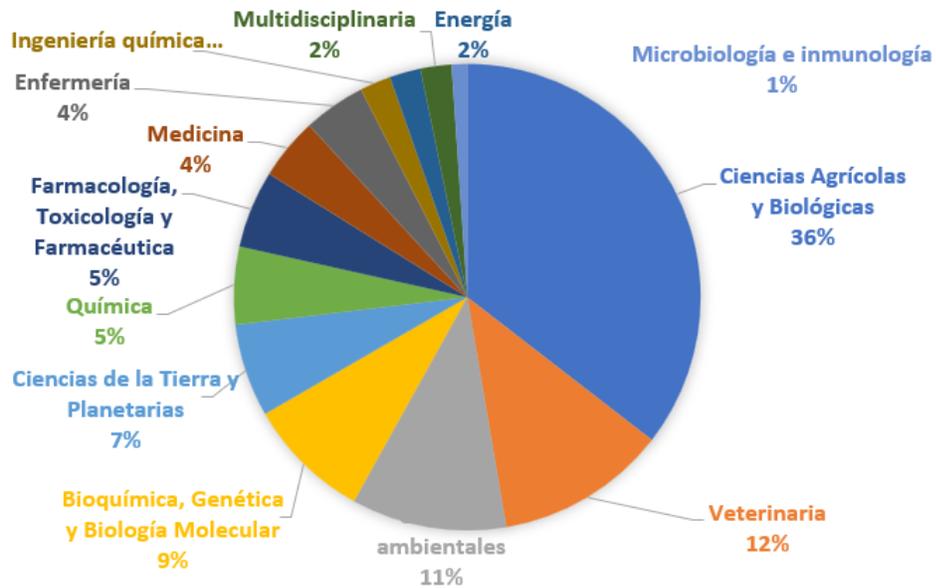
## **2.2. ALTERNATIVAS DE USO PARA LOS DESECHOS DE NOPAL Y LA TUNA EN LA ALIMENTACIÓN DE RUMIANTES**

El nopal es un recurso con alto potencial agrotecnológico pues es usado en fresco como alimento para humanos (nopal para verdura) o como base en la industrialización para obtener productos alimenticios, farmacéuticos, medicinales y agropecuarios (Pinos-Rodríguez et al., 2006). Las técnicas y tecnologías disponibles a la fecha nos permiten investigar diversas maneras para el uso del nopal en los sistemas de producción animal y comprobar sus beneficios. Por ejemplo, en los periodos de escasez de forraje los cladodios del nopal se encuentran verdes (frescos) y aportan nutrientes para la crianza de bovinos, ovinos, caprinos e incluso ayuda a mantener a la fauna silvestre (Feugang et al., 2006), aportando: materia seca (12 a 18 %), proteína cruda (4.4 a 8.3 %), cenizas (8.1 a 27.5 %), calcio (1.8 a 4.5 %) y fósforo (0.1 a 0.3 %) (Batista et al., 2009), siendo así un alimento no balanceado, altamente aprovechable por los animales debido a su alta digestibilidad (mayor a 80 %).

La investigación del nopal como fuente de alimento para rumiantes ha incrementado en los últimos años, demostrando con esto su importancia. La Figura 2 muestra tres etapas en la dinámica de publicación de artículos científicos sobre el uso de nopal en la producción animal; la primera etapa que comprende de 1984 a 1994 solo se reportaron tres publicaciones; en la segunda etapa de 1995 al 2013 se alcanzaron 13 publicaciones y, en la tercera etapa de 2014 a 2021 se observa un notable interés alcanzando en promedio 4.6 publicaciones por año y un total de 37 artículos. De acuerdo con la base de datos de resúmenes y citas SCOPUS, los documentos se clasificaron en 13 áreas científicas (Figura 2), el 57 % de la producción científica total se agrupan en tres de ellas que son de mayor interés para la producción pecuaria; ciencias agrícolas y biológicas, bioquímica, genética y biología molecular y, veterinaria. En 33 artículos el nopal se utiliza para la nutrición animal: diez refieren a el uso de nopal en fresco, cuatro como harina de nopal, dos en ensilado de nopal y los 17 restantes estudian directamente las características y cualidades que presenta la planta.



**Figura 2** Dinámica de publicación científica sobre el nopal en la nutrición animal.



**Figura 3** Producción científica sobre el nopal por área temática.

Las investigaciones han permitido generar información referente al uso de nopal como ingrediente en dietas para la engorda de ovinos, en las que se incluyó nopal deshidratado y otras dietas con nopal fresco y harina de nopal, y en las que se demostró que el comportamiento productivo de los borregos alimentados con nopal semejante al que se obtiene con una dieta formulada con ingredientes convencionales.

El ofrecer el nopal fresco a los ovinos no es la mejor alternativa debido a que: 1) induce una rápida sensación de llenado del rumen atribuido a su alto contenido de agua, lo que ocasiona un bajo consumo de alimento; 2) la inclusión de una proporción mayor a 17 % MS de cladodios frescos causa la producción de heces blandas, olorosas y amarillentas, lo que disminuye la respuesta productiva debido muy probablemente a una menor absorción de nutrientes y 3) dificulta su manejo cuando el productor tiene que diariamente sacar sus animales a pastorear la nopalera o cortar cladodios para ofrecerlo en el comedero. En virtud de lo anterior, se investigan tecnologías para el manejo y mejor aprovechamiento animal del nopal y los desechos del cultivo de nopal y tuna como: formulación y elaboración de bloques multinutricionales, deshidratación y molido de nopal, fermentación sólida y semisólida de nopal y, ensilado del nopal (Figura 4 y 5) (Miranda-Romero et al., 2018).



**Figura 4** Elaboración de ensilados de nopal, con productores de la región de Otumba, Estado de México.



**Figura 5** Dietas integrales para borregos en engorda con ensilado de nopal.

### 2.3. USO DEL NOPAL EN LA PRODUCCIÓN PECUARIA EN MÉXICO

El nopal constituye una fuente de alimento para el ganado, con un costo relativamente bajo, pero su contenido nutrimental depende de la variedad o cultivar de nopal (Cuadro 1) y del manejo que se le realiza. Puesto que en nopal tiene una proporción baja de proteína y alta en carbohidratos fermentables es conveniente la inclusión de otros ingredientes ricos en proteína con la finalidad de balancear la dieta en función de los requerimientos nutricionales de los animales. Además, se puede considerar como una fuente de agua, por su alto contenido de agua, reduciendo el estrés por el calor al ser consumido (Do Sacramento Ribeiro et al., 2017).

A pesar de las investigaciones y los avances que se han tenido con la información del nopal, es muy común que en México la gente siga utilizando el nopal chamuscado, es decir, se realiza una quema de las espinas en campo sobre la planta en pie para el aprovechamiento principalmente de bovinos, ovinos y caprinos; en esta práctica es esencial evitar quemar la parte inferior de la planta, para facilitar su posterior rebrote, también puede ser utilizado en bovinos lecheros estabulados, en este caso el nopal de campo es cosechado, cargado en camiones y trasladado a los establos, donde se queman las espinas, para luego picar el nopal y proporcionarlo al ganado. Adicionalmente, se ha visto que este tipo de aprovechamiento de nopal es usado en ovinos para carne, ya que se ha encontrado que el nopal se usa con éxito para reducir los costos de producción de carne ovina entre 48 y 65 %, con resultados exitosos al incluir del 15 al 30 % en base seca (Ortíz-Heredia et al., 2013).

**Cuadro 1** Contenido nutricional de diferentes variedades de nopal.

Género	MS	PC	FDN	FDA	DMS	CE	EM
	g kg <sup>-1</sup> MS					Mcal kg <sup>-1</sup> MS	
<i>Opuntia ficus indica</i>	58	137	250	183	748	211	3.2
<i>Opuntia sp.</i>	144	64	281	173	814	146	nd
<i>Opuntia sp.</i>	153	44	248	179	712	81	nd
<i>Opuntia amyclae</i>	112	57	250	181	nd	256	nd
<i>Nopalea cochenillifera</i>	116	27	274	100	nd	141	nd
<i>Nopalea</i>	187	33	241	148	711	81	nd

MS= materia seca, PC= proteína cruda, FDN= fibra detergente neutro, FDA= fibra detergente ácido, DMS= digestibilidad de la materia seca, Ce= cenizas, E= energía, nd= no determinada.

Algunas otras alternativas para el uso del nopal pueden mejorar su calidad nutritiva, como es el enriquecimiento proteico mediante la fermentación con microorganismos inoculados. La inoculación con *Saccharomyces cerevisiae* en el licuado de nopal puede incrementar el contenido de proteína cruda hasta en un 6 %, después de seis horas de incubación a temperatura ambiente.

Por otro lado, existe un método de conservación que ha estado generando curiosidad y ganando importancia con pequeños y medianos productores de la región centro del país, como es el ensilaje de nopal (Figura 6). En este método de conservación se ha probado y comprobado que es posible ensilar el nopal, pero para hacerlo un mejor producto se está experimentando con la combinación de diferentes materiales vegetales, tal es el caso de la tuna, subproducto ya antes mencionado, que aporta buena cantidad de carbohidratos. Además de la tuna, también se están llevando a cabo experimentos con diferentes subproductos agrícolas, buscando una alternativa viable para obtener un producto balanceado de bajo costo, que además de dar un valor agregado a los subproductos agrícolas, se está obteniendo alimento apto para la producción animal, impactando positivamente a la reducción de contaminantes del medio ambiente (Figura 7).



**Figura 6** Ensilado de nopal a pequeña escala con tambos de plástico de 200 litros.



**Figura 7** Desperdicio y contaminación de parcelas a causa de nopal maduro y tuna no comercializada.

## 2.4. PERSPECTIVAS Y LÍNEAS DE INTERÉS PARA LA INVESTIGACIÓN

En los últimos años, las investigaciones sobre el uso del nopal se han enfocado en los compuestos secundarios y en los usos farmacológicos que presenta, dejando de lado el área de la alimentación animal; sin embargo, a pequeños y medianos productores de la región centro del país les ha surgido el interés para el aprovechamiento del nopal para la producción pecuaria, lo que está generando nuevamente interés entre los investigadores y estudiantes. Con las nuevas técnicas y tecnologías disponibles actualmente, es factible iniciar nuevas investigaciones con diferentes procesos para la utilización del nopal, aprovechando las bondades de la planta y obteniendo beneficios para la producción animal, incluso transformando subproductos agrícolas para conseguir alimento de buena calidad que ayuden a generar recursos a los pequeños y medianos sistemas de producción pecuaria.

## 2.5. LITERATURA CONSULTADA

- Batista, Á. M. V., Ribeironeto, A. C., Lucena, R. B., Santos, D. C., Dubeux, J. B., y Mustafa, A. F. (2009). Chemical composition and ruminal degradability of spineless cactus grown in Northeastern Brazil. *Rangeland Ecology and Management*, 62(3), 297–301. <https://doi.org/10.2111/07-099R1.1>
- do Sacramento Ribeiro, J., Santos, L. L., de Lima Júnior, D. M., de Albuquerque Mariz, T. M., Ladeira, M. M., de Azevedo, P. S., Lima, C. B., y dos Santos Silva, M. J. M. (2017). Spineless cactus associated with Tifton hay or sugarcane bagasse may replace corn silage in sheep diets. *Tropical Animal Health and Production*, 49(5), 995–1000. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1288-6>
- Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C., y Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*, 11, 2574–2589.
- Miranda-Romero, L. A., Vázquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., y Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 196–215.
- Monter-Arciniega, A., Hernández-Falcón, T. A., Cruz-Cansino, N. del S., Ramírez-Moreno, E., Alanís-García, E., Arias-Rico, J., y Ariza-Ortega, J. A. (2019). Functional Properties, Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Purple Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Waste: Comparison with Commercial Fibers. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 2897–2906. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0320-z>
- Ortiz-Heredia, M., Miranda-Romero, L., Lara-Bueno, A., Martínez-Hernández, P., Sánchez del Real, C., y Aranda-Osorio, G. (2013). Comportamiento productivo de corderos con dietas de harina de nopal y ensilado nopal-tuna. En: Memoria de la XL Reunión de la Asociación Mexicana para la Producción Animal y Seguridad Alimentaria, A. C. y I Seminario Internacional de ovinos en el Trópico. 445–448.
- Pinos-Rodríguez, J. M., Duque-Briones, R., Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., García-López, J. C., y González-Muñoz, S. (2006). Effect of species and age on nutrient content and digestibility of *Opuntia* spp. *Journal of Applied Animal Research*, 30, 13–17.
- Rodríguez, F. H., López, J. J., Rodríguez, A., y Jiménez, G. (2009). Cultivo orgánico del Nopal. CDMX, México: Trillas.
- SIAP. (2023). Avance de Siembras y Cosechas Resumen nacional por estado. [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do)

### 3. PRODUCCIÓN Y ESTRATEGIAS PARA EL USO DE OPUNTIA SPP. Y SUS DERIVADOS EN LA ALIMENTACIÓN DE ANIMALES

#### 3.1. RESUMEN

El nopal (*Opuntia* spp.) es una cactácea endémica de América; en México es cultivada para verdura o forraje y es capaz de producir 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca. En periodos de escasez de forraje, los cladodios de nopal aportan nutrientes para la cría de bovinos, ovinos, caprinos y fauna silvestre. El objetivo de la presente investigación fue analizar la investigación científica creada del nopal, los usos convencionales del nopal y la tuna, y el efecto potencial de incluirlos en la alimentación animal. La producción científica sobre el nopal muestra interés en las diferentes formas de utilizar el nopal, alcanzado 4.6 artículos por año en el periodo del 2014 al 2021, siendo las áreas de ciencias agrícolas y biológicas, bioquímica, genética y biología molecular y veterinaria las más interesadas en el nopal. Al nopal se le considera como un recurso vegetal con alto potencial agrotecnológico, como cultivo alimenticio o como elemento base para diferentes productos de la industria farmacológica, médica y agropecuaria. Los temas de investigación en años recientes consideran los cultivos de nopal y los subproductos agrícolas para la evaluación de la deshidratación y molido de cladodios en la formulación de dietas, la inclusión de cladodios de nopal en la elaboración de bloques multinutricionales, la fermentación aeróbica y el ensilaje de nopal como una forma para el enriquecimiento y conservación nutricional de este producto. Para que el nopal pueda ser utilizado por pequeños y medianos productores para la alimentación de rumiantes, es necesario combinarlo con diferentes ingredientes para mejorar sus características nutricionales, por lo que es recomendable seguir con la investigación de subproductos agrícolas para ser utilizados junto con el nopal.

**Palabras clave:** nutrición animal, aporte nutricional del nopal, alimento de rumiantes, subproductos agrícolas.

### 3.2. ABSTRACT

The cactus (*Opuntia spp.*) is an endemic plant to the Americas; in Mexico it is grown as a vegetable or forage crop and can produce 20 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> of dry matter. In periods of forage scarcity, cactus cladodes provide nutrients for cattle, sheep, goats, and wildlife. The objective of the present research is to analyze the scientific research on cactus, the conventional uses of the cactus and the prickly pear, and the potential effect of including them in animal feed. Scientific production on cactus shows interest in the different ways of using it, reaching 4.6 articles per year in the period from 2014 to 2021, with the areas of agricultural and biological sciences, biochemistry, genetics and molecular biology, and veterinary science being the most interested in. The cactus is considered as a plant resource with high agro-technological potential, as a food crop or as a base element for different products of the pharmacological, medical, and agricultural industries. Research topics in recent years consider cactus crops and agricultural by-products for the evaluation of dehydration and grinding of cladodes in the formulation of diets, the inclusion of cactus cladodes in the elaboration of multinutritional blocks, aerobic fermentation, and cactus silage as a way for the nutritional enrichment and conservation of this product. To be used by small and medium producers for ruminant feed, it is necessary to combine the cactus with different ingredients to improve its nutritional characteristics, so it is advisable to continue with the research of agricultural by-products to be used together with it.

**Key words:** animal nutrition, nutritional contribution of prickly pear cactus, ruminant feed, agricultural by-products.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia* spp.) es una cactácea endémica de América con 258 especies identificadas, de las cuales 100 se encuentran en México (Rodríguez et al., 2009); es cultivado en países como Sudáfrica, Israel, Italia, Estados Unidos, México, Brasil y Chile (Flores-Valdez & De Luna-Esquivel, Ramírez-Moreno, 1995). En Italia se usa para producir tuna para consumo humano, en Brasil se cultiva *Opuntia* spp. y *Nopalea* spp. como forraje, y en el norte de México se cultiva como forraje, capaz de producir hasta 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca (Dubeux et al., 2011), suficiente para alimentar cinco vacas adultas por año, reduciendo la presión en los pastizales de la zona (Dubeaux et al., 2018). En el resto de México se cultiva intensivamente esta cactácea como nopal verdura y tuna como fruta fresca para consumo humano (Felker et al., 2006).

En la producción intensiva de tuna y nopal verdura en México, la poda de cladodios maduros y enfermos es una labor cultural para estimular la producción, facilitar la cosecha o para mantener sano el cultivo (Granados & Castañeda, 1996). Esta práctica genera gran cantidad de residuos dejados en campo para su descomposición (Monter-Arciniega et al., 2019). Puesto que los cladodios de nopal son ricos en cenizas (Torres, 2010), su descomposición libera compuestos inorgánicos como: calcio, fosfatos y otros minerales, que se lixivian hacia los mantos freáticos, favoreciendo la eutroficación de lagos y lagunas (Lozano-Rivas, 2012). La descomposición anaeróbica de los cladodios produce compuestos volátiles como CH<sub>4</sub>, mientras que su descomposición aeróbica genera óxidos de nitrógeno (Kiss & Encarnación, 2006), ambos gases con efecto invernadero. También promueve plagas y enfermedades que dañan los cultivos (Altieri & Nicholls, 1994).

En periodos de escasez del forraje, los cladodios de nopal aportan nutrientes para la cría de bovinos, ovinos, caprinos y fauna silvestre (Feugang et al., 2006). Los cladodios contienen de 12 a 18 % de MS, 4.4 a 8.3 % de proteína cruda (PC), de 8.1 a 27.5 % de cenizas, de 1.8 a 4.5 % de calcio y de 0.1 a 0.3 % de fósforo

(Batista et al., 2009; Gebremariam et al., 2006), por lo que se considera un alimento no balanceado; sin embargo, tiene una digestibilidad mayor que 80 % (do Sacramento Ribeiro et al., 2017). Aguilar-Yáñez et al. (2011) investigaron la engorda de ovinos con dietas con 17 % de nopal deshidratado y otra dieta con 17 % de nopal fresco, mientras que Muciño-Castillo et al. (2014) engordaron ovinos con dietas con 25 y 50 % de harina de nopal, encontraron que el comportamiento productivo fue semejante al que se obtiene con una dieta formulada con ingredientes convencionales. Aunque los cladodios pueden ofrecerse frescos, se están investigando tecnologías para manejar los desechos del cultivo de nopal, tales como: elaboración y formulación de bloques multinutricionales (Mejía-Haro et al., 2011), cladodios deshidratados y molidos (Díaz-Ayala et al., 2015), fermentación sólida y semisólida de cladodios (Pandey, 2003) y ensilado (Vázquez-Mendoza, 2016). El objetivo de la presente investigación es analizar los usos convencionales del nopal y tuna, y el efecto potencial al incluirse en la alimentación de animales.

### **3.4. MÉTODOS**

De acuerdo con la metodología descrita por Koutsos et al. (2019), se accedió en la base de datos Scopus para identificar trabajos publicados hasta el 2021. Se introdujeron en el buscador las siguientes combinaciones de palabras: “Opuntia”, “Ficus indica”, “nopal” y “animal nutrition”, que se encontraran dentro del artículo científico, resumen y palabras clave, para obtener los resultados más adecuados, orientados a la investigación; a partir del objetivo se realizó un temario que permitió estructurar los subtemas relacionados con la producción de nopal.

#### **3.4.1. Criterios de inclusión y exclusión de los artículos**

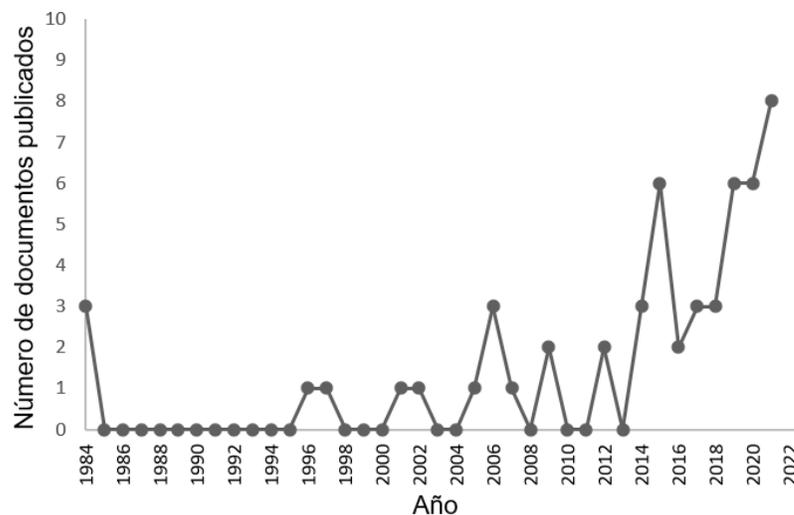
Los criterios de inclusión fueron: 1) artículos publicados física o en línea; 2) con factores y variables de interés; y 3) aportaran para cumplir con el objetivo. Los de exclusión fueron: 1) texto en idiomas diferentes al español o inglés; y 2) sin aporte al objetivo.

### 3.4.2. Análisis bibliométrico

Al aplicar un análisis bibliométrico se decidió la clasificación de las publicaciones incluidas en los puntos de la dinámica de publicación (comportamiento de la cantidad de publicaciones que se han realizado en los diferentes años), clasificación del tipo de documento publicado (artículos científicos, artículos de revisión, capítulos de libros y resúmenes en congresos), producción científica dependiendo del área temática y producción de documentos por país (información dada por Scopus) (Koutsos et al., 2019).

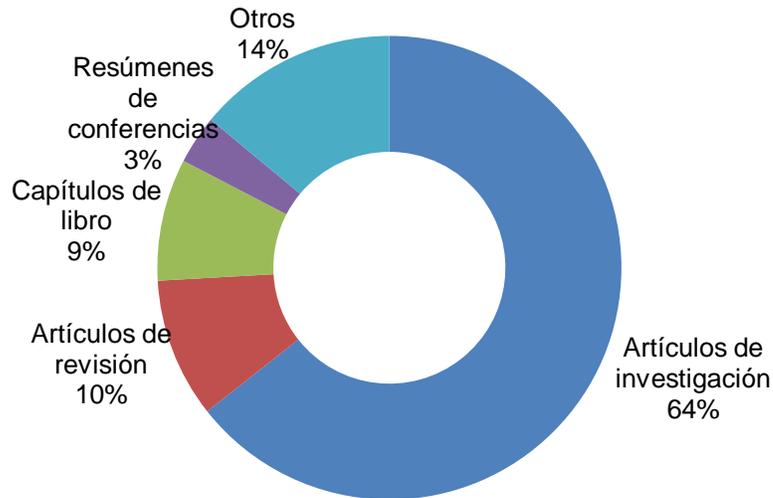
### 3.5 RESULTADOS

Se obtuvieron 53 documentos relacionados con el nopal en la nutrición de animales; en el año de 1984 se inició el registro de estas investigaciones en la plataforma de Scopus (Figura 8). La publicación de artículos sobre nopal se clasificó en tres etapas: la primera de 1984 a 1994, con tres publicaciones; la segunda de 1995 a 2013, con 13 publicaciones; y, la tercera de 2014 a 2021, con 37 publicaciones (Figura 8). Con base en esta clasificación se puede inferir sobre la importancia que está generando la forma de utilización del nopal.



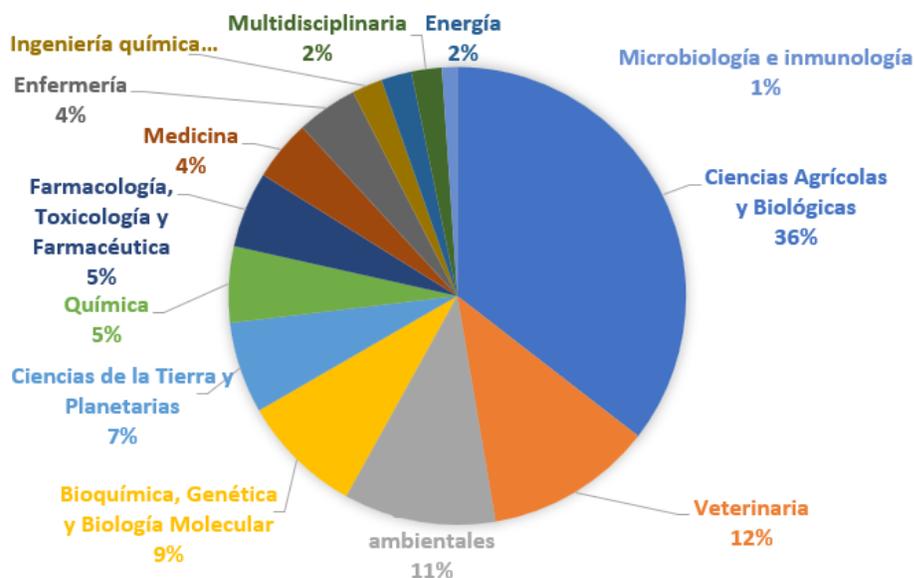
**Figura 8.** Documentos publicados anualmente sobre uso del nopal en la nutrición de animales en el período de 1984 a 2021.

Los documentos publicados entre 1984 a 2021, 86 % fueron artículos científicos (de investigación y de revisión), capítulos de libros y resúmenes de conferencias (Figura 2).



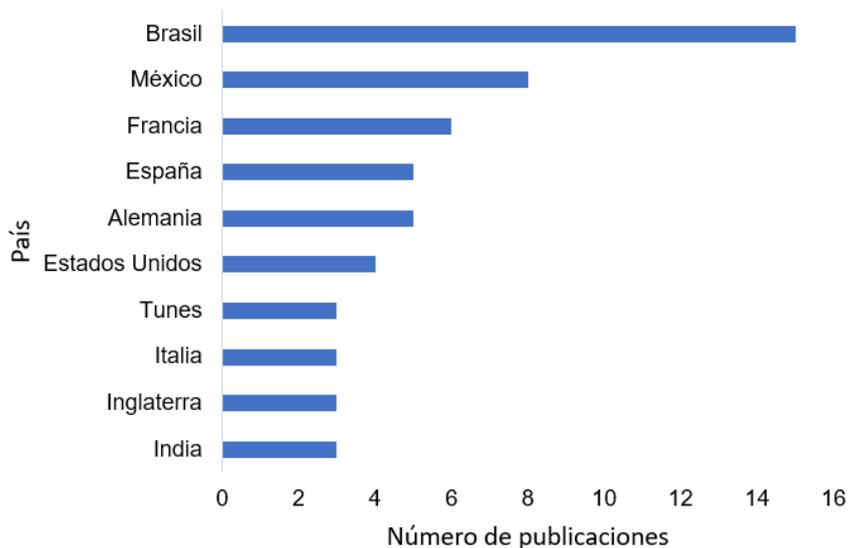
**Figura 9.** Clasificación por tipo de documento publicados.

De las 13 áreas de clasificación (Figura 10), tres generan interés (57 % del total de documentos publicados): ciencias agrícolas y biológicas; bioquímica, genética y biología molecular; y veterinaria. Dentro de estas áreas de interés, en 33 artículos se utiliza el nopal para la nutrición de animales, 10 estudios refieren el uso de nopal en fresco, 4 en harina de nopal, 2 en ensilado de nopal y los 17 estudios restantes estudian directamente las características y cualidades que presenta la planta.



**Figura 10.** Distribución de los documentos publicados por área temática.

Con base a país de origen de la investigación, resaltan Brasil, México y Francia, con 15, 9 y 6 documentos publicados, respectivamente (Figura 4), cuyo interés quizá se deba a la producción intensiva y los beneficios que han encontrado al darles alimento a base de nopal a sus animales.



**Figura 11.** Número de documentos publicados por país de origen de la investigación.

### 3.5. PRODUCCIÓN DE NOPAL Y TUNA

Debido a la breve persistencia del cladodio no se han encontrado sus residuos en los sitios arqueológicos, sin embargo, se puede especular que los antiguos mesoamericanos pudieron verse obligados al consumo de brotes tiernos de nopal para saciar la sed, reconociendo a los cladodios tiernos como una fuente ocasional de agua. También pudieron usarse como alimento de emergencia en tiempos de escasez de fruta, situación muy frecuente en el clima semiárido predominante en el Altiplano Mexicano (Hoffmann, 1995). Posteriormente, una etapa importante del proceso para la domesticación del nopal fue la identificación de plantas sin espinas, una característica mutante que puede limitar la sobrevivencia de las plantas en un ambiente natural (Gutiérrez et al., 2009). El cultivo del nopal, que viene de los antepasados, ha provocado que México sea de los principales países productores y consumidores de nopal verdura en el mundo (Griffith, 2004).

La demanda del mercado moderno, poco dependiente de una producción local y disponibilidad estacional, ha causado interés por la producción de nopalito fuera de su temporada normal, se le considera como idóneo para la producción durante todo el año. Por esta razón, las zonas productoras se han expandido a áreas con climas diversos, i. e. con inviernos moderados o climas subtropicales, incluso se han adaptado tecnologías utilizadas en otros cultivos como es la adopción de varias formas de invernaderos. Dado el estado original de cultivo, apto para productores de recursos limitados en sitios de baja productividad, la producción de nopalitos en invernadero ha evolucionado gradualmente (Corrales-García, 2011; Felker et al., 2006).

Las variedades disponibles para producir nopal verdura son “Milpa Alta”, “Atlixco” y “COPENA V1” (Pinos-Rodríguez et al., 2006). En México, la producción de nopal verdura en 2019 ocupó 12,630 ha, con una producción de 812,000 t; 46.1 % de la producción proviene del estado de Morelos (SIAP, 2023). En México se tienen tres sistemas de producción, 1) Nopaleras silvestres que son fuente de

alimento para el ganado y rara vez se utilizan para procesos industriales, debido al desconocimiento de las características del cladodio, 2) Nopaleras en huertos familiares en el medio rural que son un componente importante en la dieta de la familia, cuya superficie se desconoce, pero la producción es para autoconsumo y venta en mercados, y 3) Nopaleras de plantación comercial, iniciadas en 1950, con una rigurosa selección de las mejores variedades para consumo humano, cuya producción la impulsan programas de investigación y desarrollo (Felker et al., 2006).

En etapas tempranas de la utilización del nopal, el órgano de interés fue el fruto, de hecho, el consumo de frutos maduros por las civilizaciones prehispánicas está documentado a través del estudio de coprolitos encontrados en cuevas, demostrando que estos frutos formaban parte de la dieta de varias tribus (Hoffmann, 1995). Actualmente, el nopal se cultiva en un rango amplio de ambientes y condiciones, con diferencias en las prácticas de manejo del cultivo de tuna (Inglese et al., 2002). La planificación cuidadosa es importante para el establecimiento de una nopalera de plantación comercial y considera: A) condiciones climáticas del sitio de plantación, pues las plantas toleran temperaturas altas sin perjudicar el crecimiento o la producción, pero si se cultivan en zonas con temperaturas menores a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pueden correr peligro (Ochoa et al., 2015); B) análisis físico y químico del suelo, preparándolo con anticipación, sin malezas, con pH neutro y buen espacio para que crezcan las raíces (Singh, 2003); C) selección de la variedad para las condiciones climáticas de la región y la demanda del mercado a donde se quiere entrar (Consoli et al., 2013); y D) instalación de un sistema de riego de emergencia en caso de precipitaciones menores a 400-600 mm al año, pues aunque el nopal tolera la sequía y es eficiente en el uso del agua, la planta requiere un mínimo para el correcto llenado de la fruta (Zegbe et al., 2015).

La producción de tuna en México ronda 344,000 t, con una superficie estimada de 53,000 ha (SIAP, 2023). Los principales estados productores de tuna son

Estado de México (41.4 %), Zacatecas (20.2 %) y Puebla (21.9 %), concentrando 83.4 % del total de la producción.

### **3.6. USOS DEL NOPAL**

Méndez-Gallegos y García-Herrera (2006) concluyeron a partir de estudios de mercado del sistema productor de nopal y tuna en México, de 562,560 t producidas, 85.8 % se consumió en fresco, y 7 % es destinado a la industria y exportación. Este consumo se concentra en 75 % durante la temporada alta (marzo - septiembre). De acuerdo con el estudio citado, el consumo anual *per cápita* de nopal en fresco en la región del centro del país fue 6.72, 5.25, 3.66 y 5.87 kg per cápita para las regiones centro, norte, sur y occidente del país, respectivamente.

Algunos productos utilizados en la industria farmacéutica y cosmética, así como suplementos alimenticios, como la harina, cápsulas y comprimidos de nopal, se procesan en México. La industria farmacéutica de derivados del nopal para el control de enfermedades como diabetes, colesterol, problemas gastrointestinales y sobrepeso, se ha desarrollado con base en la herbolaria tradicional de Mesoamérica (Ramadan & Mörsel, 2003).

La elaboración de harina, cápsulas y comprimidos de nopal no es algo nuevo, para ello es necesario la deshidratación de la materia prima, con temperaturas menores a 60 °C con aire forzado, y posterior molienda hasta obtener la harina. Esta harina se encapsula o se le adiciona un aglutinante y se comprime, para obtener pastillas o tabletas (Andrade-Montemayor et al., 2011). La producción de derivados de nopal con aplicaciones medicinales, ha crecido en México de una manera acelerada, y se comercializa por empresas nacionales y para exportación a Estados Unidos como complementos alimenticios (Andrade-Montemayor et al., 2011). A nivel mundial ha crecido la demanda del nopal para usarlo como fibra dietética, por lo que se han realizado exportaciones de México a Norteamérica, Europa y a algunos países orientales (Feugang et al., 2006).

Los cosméticos de nopal son usados para embellecer la piel y el cabello; con base en los beneficios a la piel han surgido empresas que fabrican cosméticos cuyas formulaciones incluyen al nopal. Estos productos son cada vez más aceptados debido a su origen natural. Debido a que la industria de cosméticos no requiere de grandes cantidades de nopal, pues es sólo un complemento en las formulaciones de estos productos, no es la mejor opción para solucionar los problemas de sobreoferta de nopal que se tiene en temporadas en México (Chavez-Santoscoy et al., 2009).

El nopal también participa en la producción de champús, por ejemplo, en los transparentes se hacen en frío mezclando bases químicas con mucílago del nopal, y demás elementos, mientras que el champú crematizado se realiza en un medio caliente se adicionan cutina, un agente crematizante, las bases químicas y mucílago de nopal, sin dejar enfriar (Chavez-Santoscoy et al., 2009). En cuanto a los acondicionadores de nopal, son líquidos viscosos que se pueden usar como un complemento del champú para remover residuos, logrando suavizar el cabello y facilitando su manejo. Se pueden encontrar champús y acondicionadores de nopal en productos separados o mezclados (Torres-Ponce et al., 2015).

Los jabones de nopal son por lo general blancos y duros, amasados, cortados y prensados, que se obtienen tratando un cuerpo graso con sosa, con menos de 0.05 % de álcali libre, deshidratado hasta tener un 20 % de humedad en el producto, con adición de colorantes, aromatizantes y mucílago de nopal. Los jabones transparentes contienen azúcar, glicerina y un alcohol que permite conservar su homogeneidad y evita que se cristalicen u opaquen al enfriarse (Feugang et al., 2006). Las cremas de nopal son emulsiones elaboradas con aceite vegetal, agua, mucílago de nopal y un jabón especial obtenido a partir de una cera esterificada bajo condiciones alcalinas suaves, conocidas como pomadas blandas, constituidas esencialmente por agua y materias grasas, exentas de polvos en suspensión. Estas preparaciones, a las que se les adiciona mucílago o pulpa molida de nopal, se elaboran en diferentes composiciones,

según su uso como crema limpiadora, humectante o de noche (Torres-Ponce et al., 2015).

Los geles de nopal son sustancias adsorbentes que se obtienen mediante evaporación del líquido contenido en la masa que resulta de la floculación y coagulación de una disolución coloidal, adicionada con extracto de nopal e ingredientes activos según el uso del gel. Hay geles reductivos de grasa, fijadores del cabello y para la ducha (Torres-Ponce et al., 2015). Las lociones son soluciones hidroalcohólicas, con perfumes y principios para el cuidado de la piel, con agentes astringentes, bactericidas y disolventes de grasa seboreica, adicionadas con mucílago o pulpa molida de nopal (Sepúlveda et al., 2007). Las mascarillas de nopal son pastas faciales (similares a las cremas) que pueden reconstituir, humectar, limpiar, desmanchar o aportar vitaminas a la piel, a las que se adiciona mucílago o pulpa de nopal (Torres-Ponce et al., 2015).

### **3.6.1. Otros usos del nopal en México**

En México existen algunos usos tradicionales para el nopal es la clarificación del agua. Esto se debe a que se aprovechan las propiedades de adsorción y aglutinación del mucílago, y con esta propiedad lo que se pretende es precipitar arcilla y materiales orgánicos en suspensión del agua. Cárdenas y colaboradores (1997) indicaron como resultado, la eliminación de la turbidez del agua, sin embargo, no significa que el agua así tratada sea apta para el consumo humano. Para clarificar el agua se pueden usar dos formas: la primera consiste en dejar expuesto el mucílago y meterlo al agua; y la segunda, en picar el cladodio y también introducirlo al agua.

El nopal como clarificador de agua se usa en México, Chile, Argentina y en otros países. Actualmente, en México este uso del nopal es muy reducido, debido a que la gran mayoría de las comunidades dispone de agua potable; sólo en algunas rancherías, en que la población se abastece de represas, donde también abreva el ganado, al agotarse estas, el agua se enturbia mucho, o en su caso cuando no se dispone de otro sistema de filtrado (por ejemplo, de filtros de

cantera) (Anaya-Pérez & Bautista-Zane, 2008). En la actualidad no existen industrias para obtener clarificador de agua a partir del nopal, y no se contemplan perspectivas comerciales para este producto, aunque su uso rústico seguirá en comunidades marginadas.

Otro uso es como adherente para encalados. En este caso se aprovechan las propiedades adherentes del mucílago y las gomas de los cladodios del nopal para reforzar la adherencia de la cal con la superficie en donde se aplique. Esta técnica data en México desde la conquista española. El proceso más utilizado consiste en cortar el cladodio de manera longitudinal, de tal forma que la mayor parte del tejido parenquimatoso quede expuesto (Anaya-Pérez & Bautista-Zane, 2008). Estas mitades se introducen en el recipiente, donde se tiene el agua con cal para ocasionar que el mucílago de los cladodios se incorpore a la lechada, para lo que es necesario estar agitándola periódicamente antes de poder iniciar con el encalado. La lechada así preparada se utiliza, principalmente en el sector rural, para el encalado en paredes de casas, de bardas y troncos de árboles, además el uso de este tipo de lechada con la adición de cladodios se ha reportado en Chile (Sudzuki, 1992) y Argentina (Hoffmann, 1995).

### **3.6.2. Desperdicio del nopal**

Desechos y excedentes agrícolas en México, están parcial o totalmente inutilizados, por lo que contaminan el ambiente y se requieren medidas para utilizarlos, por ejemplo, para la alimentación de rumiantes (Del Razo et al., 2015). Una hectárea de nopal en un periodo de 5 años produce hasta 100 t de cladodios frescos por año, en áreas con precipitaciones de 300 mm (García de Cortázar & Noble, 1992). En algunas zonas semiáridas de México, los cladodios se colectan tradicionalmente de plantas silvestres para usarlos como forraje; la poda regular incrementa el rendimiento y mejora la calidad de los nopalitos o la fruta, y puede producir aproximadamente 10 t de materia seca (MS) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de subproductos agrícolas, dejando una importante cantidad de materia vegetal forrajero para el ganado.

### 3.7. INTEGRACIÓN DEL NOPAL EN LA PRODUCCIÓN PECUARIA

El nopal tiene un alto contenido de agua, pero un bajo contenido de nutrientes, por lo que se recomienda balancear la dieta en función de los requerimientos de los animales. Para el uso del nopal en la alimentación del ganado se pueden seguir dos procedimientos: 1) se realiza un chamuscado de las espinas en campo sobre la planta en pie para la alimentación de bovinos, ovinos y caprinos, evitando quemar la parte inferior de la planta, para facilitar su rebrote (Mejía-Haro et al., 2011); y 2) en bovinos lecheros estabulados, el nopal de campo es cosechado, cargado en camiones y trasladado a los establos, donde se queman las espinas, para luego picar los cladodios y proporcionarlo al ganado (Flores & Aranda-Osorio, 1997).

Dubeaux et al. (2018), al analizar la composición química de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*) encontraron que el cladodio de un mes de edad es más rico en vitamina C, carbohidratos no estructurales y proteínas, mientras que el cladodio de un año presenta contenidos mayores de calcio, sodio, potasio y hierro, así como de fibra.

El nopal se usa con éxito para reducir los costos de producción de carne ovina entre 48 y 65 %, con resultados exitosos al incluir del 15 al 30 % en base seca (Ortíz-Heredia et al., 2013). El contenido de nutrientes para el ganado depende de la especie, la variedad (Cuadro 2), así como del manejo que se realiza a la planta en condiciones cultivadas. Aunque su contenido de proteínas no es muy alto, el nopal constituye una fuente de alimento para el ganado a un costo relativamente bajo. Además, se puede considerar como una fuente de agua, por los altos contenidos de ésta en los cladodios, ya que el contenido de materia seca apenas llega en el mejor de los casos a poco menos de 18 % (Cervantes-Ramírez, 2005).

Los carbohidratos son la principal fuente energética para los microorganismos del rumen (Fahey y Berg, 1993), que se fermentan a ácidos grasos volátiles y aportan de 70 a 80 % de los requerimientos energéticos del rumiante (Fahey &

Berg, 1993). Conforme a lo reportado por Vázquez-Mendoza (2016) en el nopal los contenidos de FDN y FDA varían de 230 a 390 y de 100 a 260 g kg<sup>-1</sup> MS (Cuadro 2). Los cladodios contienen alta proporción de compuestos solubles (71-77 %), entre los más abundantes se encuentra el mucílago, polisacárido compuesto de azúcares como arabinosa, xilosa, galactosa y ácido galacturónico, lo que hace al nopal un ingrediente energético en la dieta de los rumiantes (Nobel et al., 1992).

**Cuadro 2.** Composición nutricional y capacidad de fermentación de cladodios de diferentes variedades de nopal.

Género	MS	PC	FDN	FDA	DMS	CE	EM Mcal kg <sup>-1</sup> MS	Referencias
			g kg <sup>-1</sup> MS					
<i>Opuntia ficus indica</i>	92	111	nd	nd	729	87	3.2	Tegegne, 2002
<i>Opuntia ficus indica</i>	120	83	392	263	nd	275	nd	Gebremariam et al., 2006
<i>Opuntia ficus indica</i>	122	51	239	162	nd	199	2.1	Tegegne et al., 2007
<i>Opuntia ficus indica</i>	128	44	259	180	nd	224	nd	Ben Salem & Abidi, 2009
<i>Opuntia ficus indica</i>	127	38	251	nd	587	317	nd	Abidi et al., 2009
<i>Opuntia ficus indica</i>	79	48	290	257	nd	109	nd	Costa et al., 2009
<i>Opuntia ficus indica</i>	58	137	250	183	748	211	3.2	(Oseguera et al., 2001)Pinos-Rodríguez et al., 2006
<i>Opuntia ficus indica</i>	95	58	298	184	nd	nd	nd	Barbosa et al., 2012
<i>Opuntia ficus indica</i>	108	39	312	217	nd	118	2.2	Costa et al., 2012
<i>Opuntia ficus indica</i>	94	60	294	171	nd	131	nd	Kamel et al., 2012
<i>Opuntia sp.</i>	144	64	281	173	814	146	nd	Batista et al., 2003
<i>Opuntia sp.</i>	153	44	248	179	712	81	nd	Batista et al., 2009
<i>Opuntia amyclae</i>	112	57	250	181	nd	256	nd	Abidi et al. 2009a
<i>Nopalea cochenillifera</i>	116	27	274	100	nd	141	nd	Costa et al., 2012
<i>Nopalea</i>	120	62	269	160	789	186	nd	Batista et al. 2003
<i>Nopalea</i>	187	33	241	148	711	81	nd	Batista et al. 2009

MS= Materia seca, PC= proteína cruda, FDN= Fibra detergente neutro, FDA= Fibra detergente ácido, DMS= Digestibilidad de materia seca, CE= Cenizas, E= Energía. **Fuente** (Vázquez-Mendoza, 2016).

La digestibilidad de un alimento tiene una estrecha relación con su composición nutritiva. La cantidad y composición de la fibra de los forrajes determina en gran medida su digestibilidad. El contenido de cenizas y su composición mineral es importante debido a las funciones que tienen como cofactores en las reacciones enzimáticas, en procesos de transporte y en estructuras celulares, lo que puede determinar su fermentación y digestibilidad ruminal. La cantidad de componentes nutritivos en los cladodios de nopal varía en función de la región, tipo de suelo y edad de planta, siendo un ingrediente que se puede incluir en la dieta de los rumiantes (Pérez et al., 2015).

### 3.7.1. Estrategias para el uso del nopal en la alimentación animal

Una alternativa del uso de cladodios de nopal que puede mejorar su calidad es el enriquecimiento proteico mediante fermentación con microorganismos inoculados. La inoculación con *Saccharomyces cerevisiae* incrementó el contenido de proteína cruda en 6 % (4.4 % al inicio, 10.4 % al final) después de seis horas de incubación a temperatura ambiente (Araújo et al., 2008). La inclusión de nopal licuado y fermentado en bloques multinutricionales es otra forma de ofrecerlo a los rumiantes (Mejía-Haro et al., 2011).

El ensilaje es otra vía de uso y conservación para el nopal y tuna. Çürek y Özen (2004) evaluaron la calidad de ensilado de cladodios jóvenes y viejos para utilizarlos en la alimentación animal y encontraron que la cantidad de materia seca y proteína cruda fue menor (20 % MS y 2.1 % de PC) que los reportados para ensilado de maíz (26 % de MS y 6 % de PC), concluyendo que el ensilaje de nopal puede ser una alternativa de uso en la alimentación y nutrición animal.

Diferentes autores investigaron el desempeño productivo de ovinos alimentados con dietas que incluyeron cladodios de nopal, en diferentes presentaciones (deshidratado, fresco y bloques multinutricionales), diversas concentraciones (de 2 a 54 %), así como diferentes variedades (Cuadro 3). El consumo de materia seca fluctuó de 982 a 1317 g d<sup>-1</sup>, y la ganancia diaria de peso de 26 a 260 g d<sup>-1</sup>, variaciones quizá debidas a las diferentes proporciones de nopal que se les daba, al lugar, clima y demás componentes de la dieta que tenían los animales.

**Cuadro 3.** Consumo y ganancia de peso en ovinos con dietas que incluyen nopal.

Variedad	Forma	CN %	CMS g d <sup>-1</sup>	GDP g d <sup>-1</sup>	CA	Fuente
<i>O. ficus indica</i>	D	36	1317	96	14	Einkamerer et al., 2009
<i>O. leucotrichia</i>	F	40	982	227	4	Mendez-Llorent et al., 2011
<i>O. ficus indica</i>	D	17	1130	260	4	Aguilar-Yáñez et al., 2011
<i>O. amyclaea</i>	BMN	2	1088	201	5	Mejía-Haro et al., 2011
<i>O. ficus indica</i>	F	48	1095	47	23	Teklehaimanot & Tritschler, 2011
<i>O. ficus indica</i>	F	28	1300	210	6	Costa et al., 2012
<i>N. cichenillfera</i>	F	54	1160	150	8	Costa et al., 2012
<i>O. ficus indica</i>	D	40	1087	26	42	Kamel et al., 2012

CN= cantidad de nopal en la dieta; CMS= consumo de materia seca; GDP= ganancia diaria de peso; CA= conversión alimenticia; D= Deshidratado; F= fresco; BMN= bloques multi nutricionales. Modificado de Vázquez 2016.

Costa et al. 2012, en un estudio donde se sustituyó 0, 25, 50, 70 y 100 % MS de maíz molido con nopal (*Opuntia ficus indica*) fresco en dietas de finalización de corderos, reportaron que el consumo de MS, materia orgánica, proteína cruda, extracto etéreo y FDN aumentó conforme se incrementó el nivel de inclusión de nopal, hasta 54 %, niveles superiores deprimieron el consumo; la ganancia diaria de peso y eficiencia alimenticia decrecieron linealmente con el aumento de nopal en la dieta, sin embargo, la conversión no se afectó.

### 3.8. CONCLUSIONES

Hasta 2021 la mayoría de las investigaciones sobre el uso del nopal se habían enfocado en los compuestos secundarios y en los usos de las propiedades farmacológicas que presenta la planta, dejando de lado el área de la alimentación animal; sin embargo, se ha iniciado con la investigación del aprovechamiento del nopal para la producción pecuaria, generando interés entre los pequeños y medianos productores. Con las nuevas técnicas y tecnologías disponibles hoy día, es factible iniciar nuevas investigaciones con diferentes procesos para la utilización del nopal, aprovechando las bondades de la planta y obteniendo beneficios para la producción animal, incluso transformando subproductos agrícolas para conseguir alimento de buena calidad que ayuden a los pequeños productores.

### 3.9. LITERATURA CITADA

- Abidi, S., Ben-Salem, B., Vasta, V., & Priolo, A. (2009). Supplementation with barley or spineless cactus (*Opuntia ficus* F. *inermis*) cladodes on digestion, growth and intramuscular fatty acid composition in sheep and goats receiving oaten hay. *Small Ruminant Research*, 87, 9–16.
- Aguilar-Yáñez, M. I., Hernández-Mendo, O., Guerrero-Legarreta, I., Ramírez-Bribiesca, J. E., Aranda-Osorio, G., & Crosby-Galván, M. M. (2011). Productive response of lambs fed with fresh or dehydrated spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, 23–35.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (1994). Biodiversity and pest management in agroecosystems. In *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. CRC Press, Second edition, Boca Ratón, pp 152.
- Anaya-Pérez, M. A., & Bautista-Zane, R. (2008). El nopal forrajero en México: Del siglo XVI al Siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 5, 167–183.
- Andrade-Montemayor, H. M., Córdova-Torres, A. V., García-Gasca, T., & Kawas, J. R. (2011). Alternative foods for small ruminants in semiarid zones, the case of Mesquite (*Prosopis laevigata* spp.) and Nopal (*Opuntia* spp.). *Small Ruminant Research*, 98, 83–92.
- Araújo, F. L., Silva, F. L., Brito, E. A., Oliveira, S., & Santos, E. S. (2008). Protein enrichment of cactus pear with *Saccharomyces cerevisiae* for ruminants feeding. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*. 60, 401–407.
- Barbosa, G., Costa, J. R. G., Medeiros, A. N., Egypto-Queiroga, R. C. R., Batista, A. M. V., Medeiros, G. R., & Filho, E. M. B. (2012). Use of different urea levels in the feeding of Alpine goats. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(7), 1713–1719.
- Batista, A. M., Mustafa, A. F., McAllister, T., Wang, Y., Soita, H., & McKinnon, J. J. (2003). Effect of variety on chemical composition, in situ nutrient disappearance and in vitro gas production of spineless cacti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 440–445.
- Batista, Â. M. V., Ribeironeto, A. C., Lucena, R. B., Santos, D. C., Dubeux, J. B., & Mustafa, A. F. (2009). Chemical composition and ruminal degradability of spineless cactus grown in Northeastern Brazil. *Rangeland Ecology and Management*, 62(3), 297–301. <https://doi.org/10.2111/07-099R1.1>
- Ben Salem, H., & Abidi, S. (2009). Recent advances on the potential use of *Opuntia* spp. in livestock feeding. *Acta Horticulturae*, 811, 317–326.
- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Jour. of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 152–157.
- Cervantes-Ramírez, M. C. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. X Encuentro de Geógrafos de América Latina, 3388–3407. Universidad de Sao Paulo, Brasil. Pp 3388 – 3407.

- Chavez-Santoscoy, R. A., Gutierrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2009). Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia spp.*) Juices. *Plant Foods for Human Nutrition*, 64(2), 146–152. <https://doi.org/10.1007/s11130-009-0117-0>
- Consoli, S., Inglese, G., & Inglese, P. (2013). Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)] Orchard in a semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8), 680–690. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000589](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000589)
- Corrales-García, J. (2011). Perspectivas agroindustriales de la postcosecha de nopalito y la tuna. *Revista Salud Pública y Nutrición*, Edición Especial No 5 pp 1-22. (ISSN 1870-0160)
- Costa, G. R., Filho, E. M. B., Medeiros, A. N., Givisiez, P. E. N., Egypto-Queiroga, R. C. R., & Melo, A. A. S. (2009). Effect of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Research*, 82, 62–65.
- Çürek, M., & Özen, N. (2004). Feed value of cactus and cactus silage. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 28(4), 633–639.
- de Miranda Costa, S. B., de Andrade Ferreira, M., Pessoa, R. A. S., Batista, Â. M. V., Ramos, A. O., da Conceição, M. G., & dos Santos Gomes, L. H. (2012). Tifton hay, soybean hulls, and whole cottonseed as fiber source in spineless cactus diets for sheep. *Tropical Animal Health and Production*, 44(8), 1993–2000. <https://doi.org/10.1007/s11250-012-0169-2>
- Del Razo, O. E., Almaraz, I., Espinosa, V., Soriano, R., Miranda-Romero, L.A., Arias, L., Guan, L., Buendía, G., & Pelaez, A. (2015). Comparative analysis of the in vitro fermentation of wasted cladodes (*Opuntia spp.*), lucerne and oat hays. *South African Journal of Animal Science*, 45(5), 470–475.
- Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.
- do Sacramento Ribeiro, J., Santos, L. L., de Lima Júnior, D. M., de Albuquerque Mariz, T. M., Ladeira, M. M., de Azevedo, P. S., Lima, C. B., & dos Santos Silva, M. J. M. (2017). Spineless cactus associated with Tifton hay or sugarcane bagasse may replace corn silage in sheep diets. *Tropical Animal Health and Production*, 49(5), 995–1000. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1288-6>
- Dubeaux, J. B., Ben Salem, H., & Nefzaoui, A. (2018). Producción y utilización de nopal forrajero en la nutrición animal. In P. Inglese, C. Mondragon-Jacobo, A. Nefzaoui, y C. Sáenz (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (Ruth Puffy, pp. 77–95). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Centro internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas Roma.

- Dubeux, J. C. B., Muris, J. P., Santos, M. V. F., Vendramini, J. M. B., Mello, A. C. L., & Lira, M. A. (2011). Improving grassland productivity in the face of economic, social, and environmental challenges. *Brazilian Journal of Animal Science*, 40, 280–290.
- Einkamerer, O. B., de Waal, H. O., Combrinck, W. J., & Fair, M. D. (2009). Feed utilization and growth of Dorper wethers on Opuntia-based diets. *South African Journal of Animal Science*, 39, 53–57.
- Fahey, G. C., & Berg, L. L. (1993). Los carbohidratos en la nutrición de los rumiantes. In *El Rumiante: Fisiología Digestiva y Nutrición*. Editorial Acribia. pp. 3005–3337.
- Felker, P., Paterson, A., & M, J. (2006). Forage potential of Opuntia clones maintained by the USDA National Plant Germplasm System (NPGS) collection. *Crop Science*, 46, 2161–2168.
- Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia spp.*) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*, 11, 2574-2589.
- Flores-Valdez, C., & De Luna-Esquivel, J. Ramírez-Moreno, P. (1995). Mercado mundial de la tuna. Schwentesius-Rinderman, R., Gómez-Cruz, M. A., Pérez-Villalba, E., Ocampo-Ledesma, J. G., Cervantes-Escoto, F. & Palacio-Muñoz, V. H. Eds. ASERCA y CIESTAAM-UACH. Universidad Autónoma Chapingo, pp 19 - 44.
- Flores, V. C., & Aranda-Osorio, G. (1997). Opuntia-based ruminant feeding systems in México. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 2–8.
- García de Cortázar, V., & Noble, P. S. (1992). Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117, 558–562.
- Gebremariam, T., Melaku, S., & Yami, A. (2006). Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility, and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 131(1–2), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.02.003>
- Granados S., D., & Castañeda P., A. (1996). El Nopal: Historia, Fisiología, Genética e Importancia Frutícola. México. Editorial Trillas. P. 227.
- Griffith, M. P. (2004). The origins of an important cactus crop, molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915–1921.
- Gutiérrez, O. E., Elias, A., Santos, H. A., Facundo, A., Morales, H., & Bernal, B. H. (2009). Uso del nopal nativo y cultivado en la alimentación de rumiantes. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 2. Mina, Nuevo León, México.
- Hoffmann, W. (1995). Agro-Ecology, cultivation and uses of cactus pear. G. Barbera, P. Inglese, y E. Pimienta-Barrios (eds.); Plant Prod, Vol. 132. Ethnobotany. P. 226.
- Inglese, P., Basile, F., & Schirra, M. (2002). Cactus pear fruit production. In *CactiBiology and Uses* (pp. 163–183). *University of California Press*. <https://doi.org/10.1525/california/9780520231573.003.0010>

- Kamel, L. B., Dellal, A., Halbouche, M., & Ghazi, K. (2012). Effect of incorporation of spineless *Opuntia ficus indica* in diets on biochemical parameters and its impact on the average weight of ewes during the maintenance. *Global Veterinarian*, 8, 352–359.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39–40.
- Koutsos, T., Menexes, G., & Dordas, C. (2019). An efficient framework for conducting systematic literature reviews in. *Science of the Total Environment*, 682, 106–117.
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Uso de Extracto de Fique (*Furcraea sp.*) como Coadyuvante de Coagulación en Tratamientos de Lixiviados. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28, 219–227.
- Mejía-Haro, J., Delgado-Hernández, J. L., Mejía Haro, I., Guajardo-Hernández, I., & Valencia-Posadas, M. (2011). Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21, 11–16.
- Méndez-Gallegos, S. J., & García-Herrera, J. (2006). La tuna: producción y diversidad. CONABIO. *Biodiversitas*, 68, 1–5. <http://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv68art1.pdf>
- Mendez-Llorent, F., Ramírez-Lozano, R. G., López-Carlos, M. A., Rodríguez-Frausto, H., Arechiga-Flores, C. F., Bonilla-Salazar, A., Núñez-González, M. A., & Aguilera-Soto, J. I. (2011). Performance and nutrient digestion of lambs fed incremental levels of wild cactus (*Opuntia leucotrichia*). *Journal of Applied Animal Research*, 39(3), 248–251.
- Monter-Arciniega, A., Hernández-Falcón, T. A., Cruz-Cansino, N. del S., Ramírez-Moreno, E., Alanís-García, E., Arias-Rico, J., & Ariza-Ortega, J. A. (2019). Functional properties, total phenolic content, and antioxidant activity of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) waste: comparison with commercial fibers. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 2897–2906. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0320-z>
- Muciño-Castillo, G., Miranda-Romero, L. A., González-Muñoz, S., Bárcena-Gama, R., & Crosby-Galván, M. M. (2014). Efecto de la inclusión de harina de nopal en dietas en la fermentación in vitro y la engorda de corderos, Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Nobel, P. S., Cavalier, J., & Andrade, J. L. (1992). Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal Experimental Botany*, 43, 641–648.
- Ochoa, M. J., Lobos, E., Portillo, L., & Vigueras, A. L. (2015). Importance of biotic factors and impact on cactus pear production systems. *Acta Horticulturae*, 1067, 327–333. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.45>
- Ortíz-Heredia, M., Miranda-Romero, L., Lara-Bueno, A., Martínez-Hernández, P., Sánchez del Real, C., & Aranda-Osorio, G. (2013). Comportamiento productivo

- de corderos con dietas de harina de nopal y ensilado nopal-tuna Memoria de la XL Reunión de la Asociación Mexicana para la Producción Animal y Seguridad Alimentaria A. C. y IX Seminario Internacional de Ovinos en el Trópico (2013) 445-448.
- Oseguera, J. A., Pinos Rodríguez, J. M., Sabas Pérez, J. G., & Salinas Pérez, P. S. (2001). Perfil metabólico sanguíneo de vacas lecheras alimentadas con dietas conteniendo lasalocida y cultivos de levadura material y métodos. *Investigación Agraria, Producción y Sanidad Animal*, 16(1), 143–152.
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 81–84.
- Pérez, M. L., Tejera, F., Darías M., J., Rodríguez R., E. M., & Díaz R., C. (2015). Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry* 188: 393-398.
- Pinos-Rodríguez, J. M., Duque-Briones, R., Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., García-López, J. C., & González-Muñoz, S. (2006). Effect of species and age on nutrient content and digestibility of *Opuntia spp.* *Journal of Applied Animal Research*, 30, 13–17.
- Ramadan, M. F., & Mörsel, J. T. (2003). Recovered lipids from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill] peel: A good source of polyunsaturated fatty acids, natural antioxidant vitamins and sterols. *Food Chemistry*, 83(3), 447–456. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00128-6)
- Rodriguez, F. H., López, J. J., Rodríguez, A., & Jiménez, G. (2009). Cultivo orgánico del Nopla, Editorial Trillas. P 96.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Enviroments*, 68, 534–545.
- SIAP. (2019). Avance de Siembras y Cosechas Resumen nacional por estado. [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do)
- Singh, G. (2003). General review of Opuntias in India. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5, 30–50.
- Sudzuki, H. F. (1992). Uso y aprovechamiento de los nopales en Chile. 5o Congreso Nacional y 3o Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento Del Nopal. Memoria de resúmenes, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México, p56.
- Tegegne, F. (2002). Fodder potential of *Opuntia ficus-indica*. *Acta Horticulturae*, 581, 343–346.
- Tegegne, F., Kijora, C., & Peters, K. J. (2007). Study on the level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. *Small Ruminant Research*, 72, 157–164.

- Teklehaimanot, H. S., & Tritschler, J. P. (2011). Evaluation of spineless cactus (*Opuntia ficus-indicus*) as an alternative feed and water source for animals during dry season in Eritrea. *Sustainable Agricultural Development* (pp. 245–252). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0519-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0519-7_18)
- Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1129–1142.
- Torres, S. A. (2010). Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes. Memoria del IX Simposium-Taller Internacional de Producción y Aprovechamiento Del Nopal y El Maguey. Nuevo León, Monterrey. Pp142 - 151.
- Vázquez-Mendoza, P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, p 109.
- Zegbe, J. A., Serna-Pérez, A., & Mena-Covarrubias, J. (2015). Irrigation enhances postharvest performance of “cristalina” cactus pear fruit. *Acta Horticulturae*, 1067, 417–422. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.57>

**4. GAS PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL IMPACT  
INDICATOR FROM *IN VITRO* FERMENTATION OF DIETS  
WITH NOPAL SILAGE (*OPUNTIA FICUS-INDICA* L.)**

Castañeda-Trujano, Francisco J.<sup>1</sup>; Miranda-Romero, Luis A.<sup>1\*</sup>; Tirado-González, Deli N.<sup>2</sup>; Tirado-Estrada, G.<sup>2</sup>; Achiquen-Millán, Jimena<sup>3</sup>, Améndola-Massiotti, Ricardo D.<sup>1</sup>; Martínez-Hernández, Pedro A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México. C.P. 5623.

<sup>2</sup>Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Aguascalientes, México. C.P. 20256.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Ejido Nuevo León, Baja California, México. C.P. 21705

\*Autor para correspondencia: [microbiologia.pecuaria08@gmail.com](mailto:microbiologia.pecuaria08@gmail.com)

**Artículo publicado en la revista Agro Productividad**

# Gas production and environmental impact indicators from *in vitro* fermentation of diets with nopal silage (*Opuntia ficus-indica* L.)

Castañeda-Trujano, Francisco J.<sup>1</sup>; Miranda-Romero, Luis A.<sup>1\*</sup>; Tirado-González, Deli N.<sup>2</sup>; Tirado-Estrada, G.<sup>2</sup>; Achiquen-Millán, Jimena<sup>3</sup>, Améndola-Massiotti, Ricardo D.<sup>1</sup>; Martínez-Hernández, Pedro A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Estado de México, México. C.P. 5623.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Aguascalientes Departamento de Ingenierías, México. C.P. 20256.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Baja California Instituto de Ciencias Agrícolas. Ejido Nuevo León, Baja California, México. C.P. 21705

\* Correspondence: microbiologia.pecuaria08@gmail.com

**Citation:** Castañeda-Trujano, F. J., Miranda-Romero, L. A., Tirado-González, D. N., Tirado-Estrada, G., Achiquen-Millán, J., Améndola-Massiotti, R., D., y Martínez-Hernández, P. A., (2023) gas production and environmental impact indicators from *in vitro* fermentation of diets with nopal silage (*Opuntia ficus-indica* L.). *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i11.2722>

**Academic Editors:** Jorge Cadena Iñiguez and Lucero del Mar Ruiz

Posadas

**Received:** April 26, 2023.

**Accepted:** October 17, 2023.

**Published on-line:** December 27, 2023.

*Agro Productividad*, 16(11). November. 2023. pp: 49-57.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license.

## ABSTRACT

**Objective:** To evaluate the global warming potential index (GWPI) and *in vitro* gas production (GP) of fattening diets in lambs fed with silage of agricultural by-products of nopal cladodes and prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) - hibiscus grain (*Hibiscus sabdariffa* L.) - oats straw (*Avena sativa* L.).

**Design/methodology/approach:** The GP technique was used to obtain the GWPI of isoproteic (crude protein (CP)) and isoenergetic diets (15% CP and 2.8 Mcal ME (metabolizable energy)) without silage (DWS; control), with corn silage (CSD) and with 10 or 20% of nopal-prickly pear-hibiscus grain-oat straw silage (DEN10, DEN20), fed for 60 days to 24 Creole fattening sheep.

**Results:** *In vitro* dry matter digestibility at 72 h (DIVMS<sub>72</sub>) was better in CSD, but similar for DEN10, DEN20, and CSD. DEN10 and DEN20 had the lowest CH<sub>4</sub> production, GWPI, and environmental impact index (EII). The low fermentable fraction (LF; GP=24-72 h) was related to DIVMS<sub>72</sub>.

**Findings/conclusions:** The cactus pear-hibiscus grain silage inclusion (DEN10, DEN20) in conventional diets had no effect on DIVMS<sub>72</sub>, but decreased CH<sub>4</sub> emissions and the GWPI.

**Keywords:** Greenhouse effect gases, environmental impact, *Opuntia-Hibiscus*-straw by-products, *in vitro* gas production technique.

## [1] INTRODUCTION

Ruminant production systems must have diverse ingredients that are a good source of nutrients, and as far as possible, reduce greenhouse gas emissions, [1], [2]. Given the scarcity and food prices increase, the utilization of agricultural by-products is an alternative to partially replace conventional sources of energy and protein used in diet formulations [3]–[5]. However, the energy and protein of these agricultural by-products do not always cover the requirements of the animals and create an imbalance in the rumen



flora, generating higher carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) production [1], [6], [7]. Incomplete fermentation of structural carbohydrates represents up to 10% of energy loss from food, [8] having an environmental impact, since CH<sub>4</sub> is considerably more polluting than CO<sub>2</sub> [9].

The CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission estimation was carried out with *in vivo* techniques such as sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>), and relatively expensive breathing chambers [10]. At the same time, ruminal fermentation CH<sub>4</sub> emission can be derived from an *in vitro* gas production technique, which is low-cost and less polluting [11], given that ruminant productive behaviour depends on the digestibility, fermentation, and nutritional contribution of their food, such as the energy: protein ratio [12], [13]. Recent studies have tested this technique to determine the potential production of greenhouse gases [14], [15].

The objective of this research was to evaluate the global warming potential index (GGWPI) and the *in vitro* gas production (PG) of fattening diets for sheep fed with nopal cladode-prickly pear-hibiscus grain-oatmeal straw silage.

## MATERIALS AND METHODS

**Location.** The research was conducted at the sheep module of the Experimental Farm and the Livestock Microbiology Laboratory of the Universidad Autónoma Chapingo.

**Silage.** Except for the hibiscus grains, all ingredients were chopped (<2.5 cm). For the silage, a 64% nopal cladode, 11% prickly pear, 10% hibiscus grain, and 15% oat stubble mixture was compacted in 200-liter plastic drums to a 650 kg m<sup>-3</sup> density. Subsequently, the drums were covered, and hermetically sealed. The silage was stored 60 days before use.

**Treatments.** Correspond to four isoproteic (15% CP) and isoenergetic (2.8 Mcal of ME kg<sup>-1</sup>) diets: diet without silage (DWS, control), diet with corn silage (CSD), and diets with 10 or 20% of nopal cladode-prickly pear-hibiscus grain-oatmeal straw silage (DEN10 and DEN20) (Table 1). These diets were fed for 60 days to 24 creole male sheep (26.9±3 kg BW MS), housed in individual pens, and randomly assigned to one of the four diets (n=6). Between 30-45 and 46-60 d, three samples of the supplied sheep Diets were dried (DS), grounded, and used for *in vitro* fermentation.

**Gas production kinetics and *in vitro* digestibility at incubation 72 h.** The diet samples were fermented, and their produced gas was assessed via the GP technique [16],

[17] following a modified and described procedure [15]. The maximum volume (Mv; mL g<sup>-1</sup>), rate (S; h<sup>-1</sup>), and the Lag phase (L; h) of the GP were estimated using a one-phase function [18] optimized with the SAS statistical software [19]; also, the dry matter degradability (DIVMS<sub>72</sub>), calculated from the initial DS and the residual DS.

Also, the fast, medium, slow, and total fermentation fractions (FFF, MFF, SFF, TFF; g kg<sup>-1</sup>) of the food were also obtained, transforming the accumulated gas volumes in the 0 to 8, 8 to 24 h, and 24 to 72 h of incubation intervals and the linear regression models described by [15].

**Environmental impact indicators and *in vitro* digestibility after 24 hours of incubation.** A modification to the GP methodology described was followed to determine the degradability (DIVMS<sub>24</sub>), total gas volume (VOLT; mL g<sup>-1</sup>), and methane

**Table 1.** Diets ingredients and nutritional composition.

Ingredient %	Diet			
	DSE	DEM	DEN10	DEN20
Oat straw	16	10	9.5	3
Ground corn	57.3	56.6	53	39
Rolled corn	-	-	-	10
Soybean paste	13.6	13.8	13	12.2
Corn Gluten	7.6	4.1	9	10.3
Mineral mix <sup>†</sup>	2	2	2	2
Calcium	2	2	2	2
Urea	0.5	0.5	0.5	0.5
Salt	1	1	1	1
Corn silage	-	10	-	-
Cactus-Prickly pear-ibiscus silage	-	-	10	20
<b>Nutritional contribution</b>				
DM% <sup>§</sup>	89.7	74.2	74.7	73.3
ME (Mcal/kg <sup>-1</sup> )	2.8	2.8	2.8	2.8
CP%	15	15	15	15
NDF%	23.5	23.9	20.7	21.3

<sup>†</sup> Vitasal ovino plus: calcium, phosphorus, magnesium, sodium, chlorine, potassium, sulfur, y antioxidants (24, 3, 2, 8, 12, 0.5, 0.5, y 0.5%, respectively); lasolacide, chromium, manganese, iron, zinc, iodine, selenium, and cobalt (2000, 5, 4000, 2000, 5000, 100, 30, y 60 ppm respectively); A, D, and E vitamins (500,000, 150,000, y 1000 UI, respectively). <sup>§</sup> DM, dry mater; ME, metabolizable energy; CP, crude protein; NDF, neutral detergent fiber.

production plus minor gases (CH<sub>4+GM</sub>). The latter was adjusted to theoretical methane (% CH<sub>4</sub>) with a 0.77 factor [14, 20]. The CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> volumes were used to calculate the Global Warming Potential Indicator (GWPI) with the equation:

$$GWPI \left( \text{mL CO}_2 \text{ eq g}^{-1} \text{DS} \right) = \text{CO}_2 \left( \text{mL g}^{-1} \right) + \left[ \text{CH}_4 \left( \text{mL g}^{-1} \right) \times 2.3 \right]. \quad [21]$$

GWPI and total gas volume (VOLT) were used to calculate the environmental impact index (EII (CO<sub>2</sub> Eq) = GWPI / VOLT).

Both fermentations for 24 and 72 h of incubation were repeated over time. Rumen inoculum from Dorpper male sheep with rumen cannula was used, adapted for 20 d to a diet without silage (DWS).

**Statistical analysis.** Analyzes of variance (ANOVA) were performed using diets as a fixed effect and repetitions (Rep) within the experiment run time (Time) as random effects (Model 1). The probability (P) of the fixed effects, the coefficients of determination (R<sup>2</sup>), and variation (CV; %) were done with the Proc GLM [19], and the adjusted probabilities of Rep (Time) and standard errors (SE) se with Proc Mixed [19].

[2] **Model (1)**

$$Y = \mu + Rep(Time)_{ij} + Diet_k + \epsilon_{ijk}$$

Where:  $Y$ =Mv, S, L, DIVMS<sub>72</sub>, FFF, MFF, SFF, TFF, CH<sub>4</sub>, GWPI, EII, DIVMS<sub>24</sub>, VOLT;

$\mu$ =general average;  $Rep(Time)$  =effect of the  $i^{th}$ -repetition within the  $j^{th}$  execution time of the experiment;  $Diet_k$ = $k^{th}$  diet effect; and  $\epsilon_{ijk}$ =random error.

The LsMeans mean comparison test [19] was performed and the difference between means was analyzed using DMS, considering the SE,  $P=0.05$  significance value, and the degrees of freedom (DF; 95) of the model error.

Simple linear correlations were obtained between pairs of variables ( $r$ ) (Proc Corr; [19]). The correlation validity was obtained through the P values; as well as the multiple linear regression models by Forward) of Stepwise (Proc Reg; [19]), considering the variables inclusion with  $P<0.15$ . The models' validity was analyzed considering the regressor variables ( $\beta_i$ ) contribution to  $R^2$  and its Mallow PC value.

[3] **RESULTS AND DISCUSSION**

Table 2 shows that the Mv fluctuated between 303.45 and 321.38 mL g<sup>-1</sup> at 72 h of incubation. These data are like those obtained by Martínez-Loperena *et al.* [22] for conventional diets, and by Vázquez-Mendoza [23] for corn or nopal silage diets; however, lower than those reported by Lazalde-Cruz [24] when 5 to 25% hibiscus seed (410.17 ml g<sup>-1</sup>) was included. The DIVMS<sub>72</sub> varied from 79.16 to 81.77%, higher than that reported by Miranda-Romero *et al.* [15] (52.3 to 54.8%) and by Muciño-Castillo [25] (61.44 to 69.55%), which suggests that the here evaluated diets show high degradation potential.

There were differences between Mv and DIVMS<sub>72</sub> diets ( $P<0.0001$ ). DWS had higher Mv (321.38 ml g<sup>-1</sup>) than DEN10 and DEN20 ( $P<0.05$ ). The DIVMS<sub>72</sub> of the CSD was higher compared to DEN10 ( $P<0.05$ ), but equal to DWS and DEN20 ( $P>0.05$ ). DEN10 and DEN20 had the same degradation potential, but lower fermentative potential (Mv) than DWS.

The S was not different between diets, but DWS and CSD had higher L than DEN10 and DEN20 ( $P<0.05$ ). Furthermore, the L of DEN20 was the lowest ( $P<0.05$ ), indicating that increasing this silage proportion in the diet reduces the lag time. Higher L values were reported by Jiménez-Santiago *et al.* [27], Muciño-Castillo [26] values of 5.15 to 8.35 h when evaluating diets with nopal flour, while Lazalde-Cruz [24] reported  $L=3.91$  h, in diets with hibiscus grain. Muciño-Castillo [26] and Lazalde-Cruz [24] reported 0.04 and 0.036 h<sup>-1</sup> S values, like this research, which had no differences between diets.

Table 2 also shows FFF, MFF, SFF, and TFF values. The FFF was different between diets ( $P<0.002$ ). Although previously studies reported similar values [15], [28], it increased as cactus silage in the diet increased ( $P<0.05$ ), suggesting higher nonstructural carbohydrate content (NSC) previously related to the FFF [29].

The DWS, DEN10, and DEN20 had lower MFF than CSD ( $P < 0.05$ ). MFF is related to starch content [29]. CSD may have had a higher content of fermentable starch (a result of silage) than DEN10 and DEN20, which have fewer starch sources; including cactus silage tends to decrease MFF [15]. However, the MFF values of the present research were similar to previous ones when evaluating diets with cassava [28] and hibiscus [24]. The SFF was higher in DWS and CSD compared to DEN10 and DEN20 ( $P < 0.05$ ). The SFF is associated with cellulose content [29]. DEN10 and DEN20 could have lower NDF than DWS and CSD due to their oat straw and ME contents (28-37%; [23] vs. 25-29% [30], [31]). DEN10 and DEN20 had lower TFF in DWS ( $P < 0.05$ ), which is again attributed to the 10% hibiscus grain inclusion in the EN, as a non-fermentable energy source in the rumen [32]. The TFF values are similar to those reported in diets with corn and nopal silage by Miranda-Romero *et al.* [15].

Table 3 shows the values for the environmental impact variables ( $CH_4$ , GWPI, EII),  $DIVMS_{24}$ , and VOLT were different among the diets ( $P < 0.0001$ ). The  $CH_4\%$  values were similar to those of previous research in which whole grain high-concentrate diets were evaluated [14], [24], [33]. The  $CH_4\%$ , GWPI, and EII were lower in the DWS than in the silage diets ( $P < 0.05$ ) and decreased when the proportion of EN increased. The IPGC and EII include the  $CH_4$  volume ( $mL\ g^{-1}\ DS$ ) in their calculation, which allows us to better understand the impact that diets can have on global warming (IPGC;  $mL\ CO_2\ eq\ g^{-1}\ DS$ ) in relation to the VOLT, which was similar in DWS, CSD, and DEN10 ( $P > 0.05$ ).

Studies mention that the  $CH_4\%$  increase with the increasing low digestibility fiber in the diet [34], in this research DWS had better  $DIVMS_{24}$ , but due to its lower content of oat straw, diets with silage decreased the EII (*i.e.* DEN20 decreased 1.02 times the EII). When comparing  $M_v$ ,  $DIVMS_{24}$  and  $DIVMS_{72}$ , it was observed that during the first 24 hours, 86.5% of the potentially digestible dry matter is digested, and 64.5% of the total gas is produced (72 h).

**Table 2.** Gas production kinetics, *in vitro* dry matter (DM) degradability, and fermentable fractions of sheep diets with corn silage and nopal silage.

Tratamiento	Mv mL g <sup>-1</sup>	S h <sup>-1</sup>	L h	IVDMD <sub>72</sub> %	FFF	MFF	SFF	TFF
					ml g <sup>-1</sup> DM			
DSE†	321.38 <sup>a</sup>	0.0408 <sup>a</sup>	3.57 <sup>a</sup>	80.10 <sup>ab</sup>	179.85 <sup>b</sup>	263.63 <sup>ab</sup>	289.63 <sup>a</sup>	733.12 <sup>a</sup>
DEM	316.20 <sup>ab</sup>	0.0412 <sup>a</sup>	3.85 <sup>a</sup>	81.77 <sup>a</sup>	172.94 <sup>b</sup>	272.84 <sup>a</sup>	280.69 <sup>a</sup>	726.47 <sup>ab</sup>
DEN (10%)	303.45 <sup>b</sup>	0.0400 <sup>a</sup>	3.24 <sup>b</sup>	79.16 <sup>b</sup>	180.64 <sup>b</sup>	253.75 <sup>b</sup>	260.27 <sup>b</sup>	694.67 <sup>bc</sup>
DEN (20%)	303.77 <sup>b</sup>	0.0404 <sup>a</sup>	2.71 <sup>c</sup>	80.36 <sup>ab</sup>	200.13 <sup>a</sup>	249.57 <sup>b</sup>	242.59 <sup>b</sup>	692.30 <sup>c</sup>
Valor de P	<0.0001	<0.13	<0.0001	<0.0001	<0.002	<0.0001	<0.0001	<0.0001
R <sup>2</sup>	0.55	0.35	0.53	0.66	0.48	0.64	0.70	0.60
VC (%)	9.11	7.43	19.38	5.18	13.24	7.69	14.45	0.34
SE	8.19	0.0009	0.19	1.20	7.01	5.77	11.19	19.19
DMS 0.05=	13.68	0.0015	0.31	2.01	11.71	9.64	18.70	32.07

†  $M_v$ , maximum volume; S, rate of gas production; L, time Lag; IVDMD<sub>24</sub>, *in vitro* dry matter digestibility 24 h; FFF, MFF, SFF, y TFF, fast, medium, slow and total fermentable fraction, respectively; DSE, diet without silage; DEM, diet with corn silage; DEN, diet with cactus silage; R<sup>2</sup> y VC determination and variation coefficient ; SE, standard error; <sup>a,b,c</sup> averages in the same column with different literals are different.

**Table 3.** *In vitro* atmospheric impact variables and dry matter digestibility (DM).

Tratamiento	CH <sub>4</sub> %	GWPI mLCO <sub>2</sub> eq g <sup>-1</sup> MS	EII CO <sub>2</sub> eq	DIVMS <sub>24</sub> %	VOLT mL g <sup>-1</sup> MS
DSE <sup>†</sup>	22.16 <sup>a</sup>	1601.64 <sup>a</sup>	5.81 <sup>a</sup>	71.30 <sup>a</sup>	205.33 <sup>a</sup>
DEM	20.54 <sup>b</sup>	1450.41 <sup>b</sup>	5.45 <sup>ab</sup>	69.70 <sup>ab</sup>	203.69 <sup>a</sup>
DEN (10%)	19.12 <sup>c</sup>	1243.18 <sup>c</sup>	5.15 <sup>bc</sup>	68.53 <sup>b</sup>	203.06 <sup>a</sup>
DEN (20%)	17.48 <sup>d</sup>	1187.92 <sup>c</sup>	4.79 <sup>c</sup>	68.46 <sup>b</sup>	190.52 <sup>b</sup>
P value	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
R <sup>2</sup>	0.6297	0.5782	0.6299	0.554	0.6222
VC (%)	20.12	21.52	16.32	5.36	6.58
EE	1.15	85.16	0.24	1.07	3.81
DMS 0.05=	1.9216	142.3023	0.4010	1.7879	6.3665

<sup>†</sup> CH<sub>4</sub>, % theoretical methane; GWPI, global warming potential index; EII, Environmental impact indicator; VOLT, total volume of CH<sub>4</sub>; DSE, diet without silage; DEM, diet with corn silage; DEN, diet with cactus silage; R<sup>2</sup>, determination coefficient; VC, variation coefficient; SE, standard error; <sup>a,b,c</sup> averages in the same column with different literals are different.

**Pearson correlations.** Table 4 shows the simple correlations between the variables evaluated in this research. The highest FFF value relates to a decrease in L ( $r=-0.75$ ;  $P<0.0001$ ). Higher FFF and Mv relate to better DIVMS<sub>24</sub> ( $r=0.26$  to  $0.37$ ;  $P<0.01$ ) and VOLT with DIVMS<sub>72</sub> ( $r=0.48$ ;  $P<0.0001$ ). Also, degradability may have similar trends after 24 and 72 h of incubation ( $r=0.46$  DIVMS<sub>24</sub> with DIVMS<sub>72</sub>;  $P<0.0001$ ). VOLT negatively correlated with the CH<sub>4</sub>% ( $r=-0.28$ ;  $P<0.01$ ), since the highest VOLT comes from the soluble carbohydrates and starch fermentation (0-24 h), expecting less CH<sub>4</sub> production [34].

**Table 4.** Correlations between the potential global warming index variable calculation via the *in vitro* gas production technique.

	GWPI	VOLT	CH <sub>4</sub>	IVD <sub>24</sub>	MV	S	L	FFF	MFF	SFF	TFF	IVD <sub>72</sub>
EII	0.83***	-0.28**	0.99***	-0.13 <sub>NS</sub>	-0.12 <sub>NS</sub>	-0.13 <sub>NS</sub>	0.07 <sub>NS</sub>	-0.28**	-0.29**	0.08 <sub>NS</sub>	-0.13 <sub>NS</sub>	-0.14 <sub>NS</sub>
GWPI		-0.01 <sub>NS</sub>	0.83***	-0.26**	-0.08 <sub>NS</sub>	-0.07 <sub>NS</sub>	0.21*	-0.37**	-0.22*	0.16 <sub>NS</sub>	-0.08 <sub>NS</sub>	-0.11 <sub>NS</sub>
VOLT			-0.28**	0.18 <sub>NS</sub>	-0.05 <sub>NS</sub>	0.31**	0	0.08 <sub>NS</sub>	0.06 <sub>NS</sub>	-0.19 <sub>NS</sub>	-0.08 <sub>NS</sub>	0.48***
CH <sub>4</sub>				-0.13 <sub>NS</sub>	-0.12 <sub>NS</sub>	-0.13 <sub>NS</sub>	0.07 <sub>NS</sub>	-0.28**	-0.29**	0.08 <sub>NS</sub>	-0.13 <sub>NS</sub>	-0.14 <sub>NS</sub>
IVDI <sub>24</sub>					-0.24**	0.182 <sub>NS</sub>	-0.35**	0.26**	-0.15 <sub>NS</sub>	-0.47***	-0.29**	0.46***
MV						-0.43***	0.22**	0.37**	0.84***	0.85***	0.96***	-0.25 <sub>NS</sub>
S							0.06 <sub>NS</sub>	-0.19 <sub>NS</sub>	-0.23*	-0.54***	-0.50***	0.36**
L								-0.75***	0.41***	0.43***	0.18 <sub>NS</sub>	-0.10 <sub>NS</sub>
FFF									0.26**	0.01 <sub>NS</sub>	0.41***	0.10 <sub>NS</sub>
MFF										0.67***	0.85***	-0.05 <sub>NS</sub>
SFF											0.89*	-0.51 <sub>NS</sub>
TFF												-0.32**

EIIA, Environmental impact indicator; GWPI, global warming potential index; VOLT, total volume; CH<sub>4</sub>, % theoretical methane; IVD<sub>24</sub>, <sub>72</sub>, *in vitro* dry matter degradation 24 and 72 hours; MV, MAXIMUM volume; s, rate of gas production; L, lag time; FFF, fast fermentable fraction; MFF, medium fermentable fraction; SFF, slow fermentable fraction; TFF, total fermentable fraction. \*\*\* $P<0.0001$ ; \*\* $P<0.01$ ; \* $P<0.05$ ; NS,  $P>0.05$ .

Better FFF and MFF could also relate to greater degradability at 24 and 72 h and lower GWPI ( $r=-0.22$  to  $-0.37$  GWPI with FFF, MFF, and  $DIVMS_{24}$ ;  $r=-0.25$  to  $r=-0.26$   $CH_4$  with FFF and MFF;  $P<0.05$ ) which corroborates that reported by Rasmussen and Harrison [34]. Although SFF positively correlated with Mv ( $r=0.85$ ;  $P<0.0001$ ), it negatively correlated with  $DIVMS_{24}$  ( $r=-0.47$ ;  $P<0.0001$ ), likewise,  $DIVMS_{72}$  also negatively correlated with TFF ( $r=-0.32$ ;  $P<0.01$ ).

Multiple linear regression models. Consistently, the SFF variable would allow obtaining the  $DIVMS_{72}$  (Y) ( $P<0.0001$ ). When including all diets:  $Y=93.92-0.05 SFF+r_{ij}$  ( $R^2=0.26$ );  $DWS: Y=94.7-0.05 SFF+r_{ij}$  ( $R^2=0.34$ ); and CSD  $Y=105.53-0.085 SFF+r_{ij}$  ( $R^2=0.77$ ). In DEN10 and DEN20 the VOLT contributed 0.16 and 0.20 to the  $R^2$  ( $P<0.0001$ ) [ $Y=11.6+0.63 DIVMS_{24}+0.13 VOLT+r_{ij}$  ( $R^2=0.42$ );  $Y=47.67+0.16 VOLT+r_{ij}$  ( $R^2=0.20$ )]. The amount of fiber contained in diets relates to gas production [15].

## CONCLUSIONS

The diets containing the silage composed of nopal cladode-prickly pear-hibiscus grain-oatmeal straw showed the same degradability potential as the control diet and were similar to the diet with corn silage. The accumulated volume of gas at 24 h negatively correlated with the methane percentage, therefore, diets high in concentrate and low in fiber have lower methane emissions. The diet with silage mainly composed of nopal cladode and prickly pear provides a greater amount of non-structural carbohydrates and more degradable fiber, which reduced the average fermentable fraction, as well as the environmental impact index 1.01 times. The slow fermentation fraction could predict the degradability at 72 h. According to these results, including this compound silage would not negatively affect the productive behavior of fattening lambs.

## REFERENCES

- [1] E. A. Ugbogu *et al.*, "The potential impacts of dietary plant natural products on the sustainable mitigation of methane emission from livestock farming," *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 915–925, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.233.
- [2] M. Wanapat, A. Cherdthong, K. Phesatcha, and S. Kang, "Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability," *Animal Nutrition*, vol. 1, no. 3, pp. 96–103, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.aninu.2015.07.004.
- [3] M. Borja-Bravo, L. Reyes-Muro, J. A. Espinosa-García, and A. Vélez-Izquierdo, "Estructura y funcionamiento de la cadena productiva de esquilmos agrícolas como forraje en la región de El Bajío, México," *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. 39, pp. 451–464, 2016.
- [4] O. P. Núñez-Torres and M. A. Rodríguez-Barros, "Subproductos agrícolas, una alternativa en la alimentación de rumiantes ante el cambio climático," *Journal of the Selva Andina Animal Science*, vol. 6, pp. 24–37, 2019.
- [5] N. Surayah Osman *et al.*, "Sunflower shell waste as an alternative animal feed," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 10, pp. 21905–21910, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.07.049.
- [6] P. E. Lara, M. C. Canché, H. Magaña, E. Aguilar, and J. R. Sanginés, "Producción de gas *in vitro* y cinética de degradación de harina de forraje de morera (*Morus alba*) mezclada con maíz," *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 43, no. 3, pp. 273–279, 2009.
- [7] F. J. Pérez-Barbería, "Scaling methane emissions in ruminants and global estimates in wild populations," *Science of The Total Environment*, vol. 579, pp. 1572–1580, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.175.
- [8] O. A. Castelán-Ortega, J. Carlos Ku-Vera, and J. G. Estrada-Flores, "Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico," *Atmósfera*, vol. 27, no. 2, pp. 185–191, Apr. 2014, doi: 10.1016/S0187-6236(14)71109-9.

- [9] J. Hill, C. McSweeney, A.-D. G. Wright, G. Bishop-Hurley, and K. Kalantar-zadeh, "Measuring methane production from ruminants," *Trends Biotechnol*, vol. 34, no. 1, pp. 26–35, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.tibtech.2015.10.004.
- [10] J. C. Rodríguez *et al.*, "Mediciones de metano y bióxido de carbono usando la técnica de covarianza de vórtices en ganado lechero semiestabulado en Sonora, México," *Terra Latinoamericana*, vol. 37, no. 1, pp. 69–80, 2019, doi: <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.412>.
- [11] M. Ramin and P. Huhtanen, "Development of an *in vitro* method for determination of methane production kinetics using a fully automated *in vitro* gas system—A modelling approach," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 174, no. 3–4, pp. 190–200, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2012.03.008.
- [12] K. A. Beauchemin, M. Kreuzer, F. O'Mara, and T. A. McAllister, "Nutritional management for enteric methane abatement: a review," *Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol. 48, no. 2, p. 21, 2008, doi: 10.1071/EA07199.
- [13] S. L. Posada and R. R. Noguera, "Técnica *in vitro* de producción de gases: Una herramienta para la evaluación de alimentos para rumiantes," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 17, no. 4, pp. 1–18, 2005.
- [14] B. E. Martínez-Hernández, O. Salvador-Flores, and L. A. Miranda-Romero, "Indicador de calentamiento global a partir de la fermentación ruminal de alimentos con diferentes niveles de energía y proteína," *Pastos y forrajes*, vol. 42, pp. 285–289, 2019.
- [15] L. A. Miranda-Romero, P. Vázquez-Mendoza, J. A. Burgueño-Ferreira, and G. Aranda-Osorio, "Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs," *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, vol. 20, pp. 196–215, 2018.
- [16] K. H. Menke and H. Steingass, "Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid.," *Animal Research Development*, vol. 28, pp. 7–55, 1988.
- [17] M. K. Theodorou, B. A. Williams, M. S. Dhanoa, A. B. McAllan, and J. France, "A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 48, no. 3–4, pp. 185–197, Aug. 1994, doi: 10.1016/0377-8401(94)90171-6.
- [18] P. Schofield, R. E. Pitt, and A. N. Pell, "Kinetics of fiber digestion from *in vitro* gas production," *Journal of Animal Science*, vol. 72, no. 11, pp. 2980–2991, Nov. 1994, doi: 10.2527/1994.72112980x.
- [19] S. Static Analisis Sistem, "Static Analisis Sistem." 2013.
- [20] R. Zhong, Y. Fang, H. Sun, M. Wang, and D. Zhpu, "Rumen methane output and fermentation characteristics of gramineous forage and leguminous forage at differing harvest dates determined using an *in vitro* gas production technique," *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 15, no. 2, pp. 414–423, Feb. 2016, doi: 10.1016/S2095-3119(15)61036-X.
- [21] G. Berra, L. Finster, and S. E. Valtorta, "Una técnica sencilla para la medición de emisiones de metano entérico en vacas," *FAVE Secc Cienc Vet*, vol. 8, no. 1, pp. 49–56, Feb. 2009, doi: 10.14409/favecv.v8i1.1479.
- [22] R. Martínez-Loperena, O. A. Castelán-Ortega, and J. G. González-Ronquillo, M. Estrada-Flores, "Determinación de la calidad nutritiva, fermentación *in vitro* y metabolitos secundarios en arvenses y rastrojo de maíz utilizados para la alimentación del ganado lechero.," *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 14, pp. 525–536, 2011.

- [23] P. Vázquez-Mendoza, “Aprovechamiento del nopal y tuna en la alimentación de ovinos,” Universidad Autónoma Chapingo, 2016.
- [24] R. Lazalde-Cruz, “Calidad química-fermentativa del esquilmo y grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) para la engorda de ovinos,” Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 2021.
- [25] G. Muciño-Castillo, L. A. Miranda-Romero, S. González-Muñoz, R. Bárcena-Gama, and M. M. Crosby-Galván, “Efecto de la inclusión de harina de nopal en dietas en la fermentación *in vitro* y la engorda de corderos,” Mérida, Yucatán, 2014.
- [26] G. Muciño-Castillo, “Evaluación nutricional de harina de nopal en dietas para borregos,” Colegio de Postgraduados, Texcoco, México., 2014.
- [27] A. Jiménez-Santiago et al., “Fermentación ruminal y producción de metano usando la técnica de gas *in vitro* en forrajes de un sistema silvopastoril de ovinos de Chiapas, México,” *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 10, no. 2, pp. 298–314, Jun. 2019, doi: 10.22319/rmcp.v10i2.4529.
- [28] V. F. Díaz Echeverría et al., “Valoración nutricional y fermentación *in vitro* de mezclas de follaje de árboles con harina de yuca en dietas para borregos,” *Acta Universitaria*, vol. 33, pp. 1–18, Feb. 2023, doi: 10.15174/au.2023.3558.
- [29] L. A. Miranda Romero *et al.*, “Quantifying non fibrous carbohydrates, acid detergent fiber and cellulose of forage through an *in vitro* gas production technique,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 100, no. 7, pp. 3099–3110, May 2020, doi: 10.1002/jsfa.10342.
- [30] E. E. Araiza-Rosales, F. o. Carrete-Carreón, F. Ortiz-Robledo, J. Sanchez-Arroyo, and E. Herrera-Torres, “Parámetros fermentativos y valor nutricional de ensilados de avena con granos de girasol y maíz,” *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 44, no. 4, pp. 545–551, 2021.
- [31] E. E. Araiza-Rosales *et al.*, “Calidad fermentativa y nutricional de ensilados de maíz complementados con manzana y melaza,” *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 2, no. 6, pp. 255–267, 2015.
- [32] Mohamed A. Shaheen, “Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as unconventional nutritional source,” *Afr J Biotechnol*, vol. 11, no. 41, May 2012, doi: 10.5897/AJB11.4040.
- [33] M. I. Rivas-Martínez, “Indicador de calentamiento global a partir de la fermentación ruminal de alimentos con diferentes niveles de energía y proteína,” 2015.
- [34] J. Rasmussen and A. Harrison, “The benefits of supplementary fat in feed rations for ruminants with particular focus on reducing levels of methane production,” *ISRN Vet Sci*, vol. 2011, pp. 1–10, Aug. 2011, doi: 10.5402/2011/613172.

## 5. INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL, SELECTIVIDAD Y DIGESTIBILIDAD DE DIETAS POR BORREGOS

### 5.1. RESUMEN

Los sistemas de producción de rumiantes son un eslabón importante en la cadena alimenticia, transforman alimentos fibrosos en productos de alto valor proteico para el consumo humanos. Este proceso de transformación genera gases de efecto invernadero, lo que hace necesario generar indicadores del impacto ambiental de la actividad pecuaria. El objetivo fue analizar la relación entre los indicadores *in vitro* de impacto ambiental y el índice de selectividad (IS) de borregos alimentados con ensilado de nopal. Para ello se alimentaron borregos con cuatro dietas balanceadas: dieta sin ensilado (DSE; testigo); dieta con 10 % de ensilado de maíz (DEM); y dieta con 10 o 20 % de ensilado de nopal (DEN10 y DEN20). Usando la técnica de producción de gas *in vitro* (TPG) se evaluó la producción de gas (PG) y la emisión de CH<sub>4</sub>; además, se calcularon la asimilación de la fracción fermentable (AFF), el indicador de impacto ambiental (IIA), el índice potencial de calentamiento global (IPCG), el índice de selectividad (IS) y la digestibilidad aparente (DigA). El consumo diario de alimento fue de 0.83 a 1.16 kg; la interacción dieta\*periodo afectó ( $p<0.01$ ) a DigA e ISFF. La DigA en el periodo de 46-60 d fue 14.44, 8.11 y 41.13 % mayor en borregos alimentados con DEM, DEN10 y DEN20 ( $p<0.05$ ) con respecto a DSE. El IPCG fue 37 % menor para DEN20 comparado con DSE ( $p<0.05$ ). Los IIA, IPCG y CH<sub>4</sub> correlacionaron negativamente con la DigA ( $R=-0.45$ ,  $-0.33$  y  $-0.38$ , respectivamente;  $p<0.001$ ), lo que se atribuyó a que la producción de CH<sub>4</sub> se da con dietas altas en forraje. Los alimentos con mayor degradabilidad ruminal reducen el impacto ambiental derivado de la menor emisión de CH<sub>4</sub>; en tanto que uso de los IIA e IPCG resultan útiles para integrar los conceptos de DigA e IS durante la evaluación de las dietas.

**Palabras clave:** subproductos agrícolas, enriquecimiento de ensilados, degradabilidad, cambio climático.

## INDICATORS OF ENVIRONMENTAL IMPACT, SELECTIVITY AND DIGESTIBILITY OF DIETS BY SHEEPS

### 5.2. ABSTRACT

Ruminant production systems are an important link in the food chain, transforming fibrous foods into products of high protein value for human consumption. This transformation process generates greenhouse gases, which makes it necessary to generate indicators of the environmental impact of livestock activity. The objective is to analyze the relationship between *in vitro* indicators of environmental impact and the selectivity index (SI) of sheep fed whit cactus silage. For this purpose, sheep were fed whit four balanced diets: diet without silage (DSE; control); diet with 10 % corn silage (DEM); and diet with 10 or 20 % cactus silage (DEN10 and DEN20). Using the *in vitro* gas production technique (TPG), gas production (PG) and CH<sub>4</sub> emission were evaluated; in addition, the selectivity index of the fermentable fraction (SIFF), the environmental impact indicator (EII), the global warming potential index (GWPI), the selectivity index (SI) and the apparent digestibility (DigA) were calculated. Daily feed intake ranged from 0.83 to 1.16 kg; diet\*period interaction affected ( $p<0.01$ ) DigA and SIFF. DigA in the 46-60 d period was 14.44, 8.11 and 41.13 % higher in sheep fed DEM, DEN10 and DEN20 ( $p<0.05$ ) than DSE. IPCG was 37 % lower for DEN20 compared to DSE ( $p<0.05$ ). IIA, IPCG and CH<sub>4</sub> correlated negatively with DigA ( $R=-0.45$ ,  $-0.33$  and  $-0.38$ , respectively;  $p<0.001$ ), which was attributed to CH<sub>4</sub> production occurring with high forage diets. Feeds with higher rumen degradability reduce the environmental impact derived from lower CH<sub>4</sub> emission; while the use of IIA and IPCG are useful to integrate the concepts of DigA and IS during diet evaluation.

**Key words:** agricultural by-products, silage enrichment, degradability, climate change.

### 5.3. ABREVIATURAS

**MS**, materia seca; **EM**, energía metabolizable; **PC**, proteína cruda; **DSE**, dieta sin ensilado; **DEM**, dieta con ensilado de maíz; **DEN10**, dieta con 10 % de ensilado de nopal; **DEN20**, dieta con 20 % de ensilado de nopal; **TPG**, técnica de producción de gas *in vitro*; **V<sub>m</sub>**, volumen máximo de producción de gas; **S**, tasa de acumulación de gas; **Lag**, fase de retraso; **FFR**, fracción fermentable rápida; **FFM**, fracción fermentable media; **FFL**, fracción fermentable lenta; **FFT**, fracción fermentable total; **IDFF**, índice de selectividad; **IAFF**, asimilación de la fracción fermentable; **V<sub>mAo</sub>**, volumen máximo de gas de alimento ofrecido; **V<sub>mAr</sub>**, volumen máximo de gas de alimento rechazado; **MS<sub>Ao</sub>**, materia seca alimento ofrecido; **MS<sub>Ar</sub>**, materia seca del alimento rechazado; **FF<sub>Ao</sub>**, fracción fermentable total del alimento ofrecido; **FF<sub>Ar</sub>**, fracción fermentable total del alimento rechazado; **FF<sub>He</sub>**, fracción fermentable del total de heces; **VT**, volumen total; **V<sub>CO2</sub>**, Volumen de dióxido de carbono; **MS<sub>Ao</sub>**, materia seca del alimento ofrecido; **MS<sub>Ar</sub>**, materia seca del alimento rechazado; **MS<sub>He</sub>**, materia seca de heces; **DIVMS**, digestibilidad *in vitro* de la materia seca; **CH<sub>4</sub>**, producción de gas metano; **PHe**, producción de heces; **CIAC**, consumo diario de cenizas insolubles en ácido por cordero; **CIAe**, cenizas en heces; **DigA**, digestibilidad aparente; **IS**, índice de selectividad; **SIV**, selectividad *in vitro*; **IIA**, indicador de impacto ambiental; **IPCG**, índice potencial de calentamiento global.

### 5.4. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción de rumiantes son un eslabón importante en la cadena alimenticia debido a que transforman alimentos fibrosos en productos (leche y carne) de valor proteico y de buena calidad para consumo humano (Lopez-Hernandez, 2012; Russell & Rychlik, 2001; Ugbogu et al., 2019; Wanapat et al., 2015). El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es un recurso alimenticio para rumiantes en regiones áridas o en donde existen sistemas de producción intensiva de fruto (tuna) o nopal verdura (Aguilar-Yáñez et al., 2011). El alto contenido de agua en el nopal limita su consumo (Andrade-Montemayor et al., 2011); sin embargo, esta característica puede aprovecharse para su manejo y conservación mediante el ensilaje; alternativa para la alimentación de rumiantes en la época de estiaje. Los ensilados de nopal pueden aportar 20 % MS, 2.1 % PC y 2.49 Mcal kg<sup>-1</sup> MS de EM, muy cercano al ensilado de maíz (26 % MS, 6 % PC y 2.6Mcal kg<sup>-1</sup> MS de EM), pudiendo ser mejorado con subproductos agrícolas que aporten proteína, energía y fibra efectiva (Gebremariam et al., 2006; Rojas-Valencia, 2011; Surayah Osman et al., 2018).

El CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> atmosféricos retienen la radiación infrarroja emitida por el sol, causando el calentamiento global, es por eso que estos gases pertenecen al grupo de gases de efecto invernadero (González & Carlsson, 2007; Hill et al., 2016). La crianza de rumiantes y el proceso de producción de alimentos de origen animal contribuyen con una cuarta parte de la emisión mundial de CH<sub>4</sub> y de CO<sub>2</sub> (Beauchemin et al., 2008; Castelán-Ortega et al., 2014; Ramin & Huhtanen, 2012). Por lo que es conveniente generar indicadores que muestren el potencial de calentamiento global y su impacto ambiental atmosférico que causan los animales debido al manejo alimenticio y el uso de dietas formuladas con ingredientes convencionales y no convencionales. (Pérez-Barbería, 2017). En ese sentido, la técnica de producción de gas *in vitro* (TPG) puede usarse para obtener tales indicadores (Martínez-Hernández et al., 2019) de acuerdo con las siguientes consideraciones: 1) el gas producido es resultado directo e indirecto de la fermentación microbiana de los componentes orgánicos del sustrato alimenticio fermentado (Bhatta et al., 2006; Eugène et al., 2019); 2) el volumen máximo de gas (Vm) representa la capacidad de fermentación y la fracción fermentable total (FFT) del sustrato, esta última expresada en g kg<sup>-1</sup> de sustrato (Miranda-Romero et al. 2018); 3) el consorcio microbiano del rumen puede usarse como herramienta para conocer el Vm o FFT del total de alimento ofrecido (Ao), el alimento rechazado (Ar) y las heces (He), si se determina la MS total ofrecida, rechazada y excretada; 4) La diferencia del Vm o FFT de la MS total del Ao y Ar, puede ser un indicador de la selectividad de la fracción fermentable, así como de la fracción fermentable consumida; 5) la diferencia de ésta última y la fracción fermentable excretada en heces puede ser un indicador tanto de la producción de gas emitida por el animal, como de la asimilación aparente de esta fracción. Estos mismos supuestos pueden aplicarse no solo al Vm o FFT, sino también la producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Por lo que el objetivo del presente trabajo es analizar la relación entre los indicadores *in vitro* de impacto ambiental y el índice de selectividad de borregos alimentados con ensilado de nopal.

## **5.5. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **5.5.1. Localización**

La investigación se llevó a cabo en el módulo de ovinos de la Granja Experimental y el Laboratorio de Microbiología Pecuaria, de la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México.

### **5.5.2. Tratamientos y manejo animal**

Los tratamientos consistieron en cuatro dietas isoprotéicas (15 % PC) e isoenergéticas (2.8 Mcal de EM kg<sup>-1</sup>): dieta testigo sin ensilado (DSE), dieta con 10 % de ensilado de maíz (DEM), y dietas con 10 o 20 % de ensilado de nopal (DEN10, DEN20; Cuadro 1). Se usaron 24 borregos machos criollos de 26.9±3 kg PV identificados, desparasitados (Ivermectina y Clorsulom 1 mL/25 kg PV; Iverfull F®) y vitaminados (vitamina A, D, y E 1mL animal<sup>-1</sup>; Vigantol ADE®), los cuales fueron alojados en corraletas individuales durante 60 días, y se le asignó al azar una de las dietas (6 corderos por dieta). Después de 10 días de adaptación a dieta, se inició con la engorda, en los períodos de 30-45 y 46-60 d de engorda, se determinó la MS (g d<sup>-1</sup>) del alimento consumido, rechazo y heces, ésta última se estimó usando como marcador las cenizas insolubles (Coca-Sinova et al. 2011). En los tres últimos días de cada período se tomaron muestras del alimento ofrecido (Ao), alimento rechazado (Ar) y heces (He) de cada borrego, fueron secadas a 65°C durante 48 horas y molidas (<2 mm) para posteriormente fermentarlas por la técnica de producción de gas *in vitro*.

### **5.5.3. Fermentación *in vitro* de alimento ofrecido, rechazo y heces**

Las muestras de Ao, Ar y He se fermentaron por 72 h a 39°C en baño María, para obtener el volumen máximo de gas (Vm; mL g<sup>-1</sup>) y las fracciones de fermentación (g kg<sup>-1</sup>) rápida, media, lenta y total del sustrato fermentado (FFR, FFM, FFL, FFT), mediante la técnica de producción de gas *In vitro* (TPG) de acuerdo con Miranda-Romero et al. (2018), para transformar el volumen de gas acumulado en los

intervalos de 0 a 8 h, 8 a 24 h y 24 a 72 h de incubación y los modelos de regresión lineal descritos por Miranda-Romero et al. (2018)

**Cuadro 4.** Composición de ingredientes y nutrimentos de dietas sin ensilado (DSE), con ensilado de maíz (DEM) y con 10 o 20 % ensilado de nopal (DEN10 y DEN20) para engorda de borregos.

Ingrediente %	Dieta			
	DSE	DEM	DEN10	DEN20
Paja de avena	16	10	9.5	3
Maíz molido	57.3	56.6	53	39
Maíz rolado	-	-	-	10
Pasta Soya	13.6	13.8	13	12.2
Gluten de maíz	7.6	4.1	9	10.3
Mezcla mineral*	2	2	2	2
Calcio	2	2	2	2
Urea	0.5	0.5	0.5	0.5
Sal	1	1	1	1
Ensilado maíz	-	10	-	-
Ensilado nopal	-	-	10	20
<b>Aporte nutrimental</b>				
MS %	89.7	74.2	74.7	73.3
EM (Mcal kg <sup>-1</sup> )	2.8	2.8	2.8	2.8
Proteína cruda %	15	15	15	15
FDN %	23.5	23.9	20.7	21.3

\*Vitasal ovino plus: calcio, 24 %; fósforo, 3 %; magnesio, 2 %; sodio, 8 %; cloro, 12 %; potasio, 0.5 %; azufre, 0.5 %; antioxidante, 0.5 %; lasolacida, 2000 ppm; cromo, 5 ppm; manganeso, 4000 ppm; hierro, 2,000 ppm; cinc, 5,000 ppm; yodo, 100 ppm; selenio, 30 ppm; cobalto, 60 ppm; vit. A, 500, 000 UI; vit. D, 150, 000 UI; vit. E, 1, 000 UI.

#### 5.5.4. Asimilación de la fracción fermentable

El volumen máximo de gas del alimento ofrecido ( $V_{m_{Ao}}$ ), rechazado ( $V_{m_{Ar}}$ ) y heces ( $V_{m_{He}}$ ), se usaron para calcular los indicadores de selectividad (ISFF) y de asimilación de la fracción fermentable (IAFF) de los borregos de acuerdo con las

fórmulas 1 y 2 y considerando la MS del alimento ofrecido (Ao), alimento rechazado (Ar) y heces excretadas (He):

$$\text{ISFF} = [(V_{m_{Ao}}) * (MS_{Ao})] - [(V_{m_{Ar}}) * (MS_{Ar})] / 10000 \text{ L} \text{----- Fórmula 1}$$

$$\text{IAFF} = [(FF_{Ao} - FF_{Ar}) - FF_{He}] \text{----- Fórmula 2}$$

Donde:

ISFF: índice de selectividad (daL animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>).

IAFF: Asimilación fracción fermentable (g kg<sup>-1</sup>).

V<sub>m<sub>Ao</sub></sub>: volumen máximo de gas del alimento ofrecido. (mL g<sup>-1</sup> MS).

V<sub>m<sub>Ar</sub></sub>: volumen máximo de gas del alimento rechazado. (mL g<sup>-1</sup> MS).

MS<sub>Ao</sub>: materia seca alimento ofrecido (g d<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>).

MS<sub>Ar</sub>: materia seca del alimento rechazado (g d<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>).

FF<sub>Ao</sub>: fracción fermentable total del alimento ofrecido (g kg<sup>-1</sup>)

FF<sub>Ar</sub>: fracción fermentable total del alimento rechazado (g kg<sup>-1</sup>)

FF<sub>He</sub>: fracción fermentable total de heces (g kg<sup>-1</sup>)

### **5.5.5. Indicadores de impacto ambiental y digestibilidad *in vivo* a 24 h de incubación**

Se determinaron la degradabilidad (DIVMS<sub>24</sub>), VT (mL g<sup>-1</sup>) y la producción de metano más gases menores (V<sub>CH<sub>4</sub>+GM</sub>; mL g<sup>-1</sup>) a 24 h de incubación, siguiendo la metodología descrita por Tirado et al. (2018). El V<sub>CH<sub>4</sub>+GM</sub> se ajustó a volumen de metano teórico (V<sub>CH<sub>4</sub></sub>; mL g<sup>-1</sup>) con el factor 0.77 calculado a partir del estudio de Pitt et al., (1999), y se calculó la proporción de metano en función del VT (%CH<sub>4</sub>=[V<sub>CH<sub>4</sub></sub>/VT]\*100). El volumen de dióxido de carbono (V<sub>CO<sub>2</sub></sub>; mL g<sup>-1</sup>) se calculó mediante la diferencia del VT y V<sub>CH<sub>4</sub>+GM</sub>.

El VT,  $V_{CO_2}$  y  $V_{CH_4}$  se utilizaron para calcular el IPCG (Fórmula 3) y el IIA (Fórmula 4) por animal por día, considerando la MS del alimento ofrecido ( $A_0$ ), alimento rechazado ( $A_r$ ) y heces excretadas ( $H_e$ ) ( $g\ animal^{-1}\ d^{-1}$ ):

Fórmula 3

$$IPCG = (V_{CO_2} * MS_{A_0}) + (V_{CO_2} * MS_{A_r}) + (V_{CO_2} * MS_{H_e}) + [(V_{CH_4} * MS_{A_0}) + (V_{CH_4} * MS_{A_r}) + (V_{CH_4} * MS_{H_e})] * 23$$

Fórmula 4

$$IIA = IPCG / VT * MS_{A_0}$$

Donde:

IPCG: Índice potencial de calentamiento global (hL CO<sub>2</sub> eq)

IIA: Indicador de impacto ambiental (eq CO<sub>2</sub>)

VT: volumen total (mL g<sup>-1</sup>)

$V_{CO_2}$ : volumen de dióxido de carbono (mL g<sup>-1</sup>)

$MS_{A_0}$ : materia seca del alimento ofrecido ( $g\ d^{-1}\ animal^{-1}$ )

$MS_{A_r}$ : materia seca del alimento rechazado ( $g\ d^{-1}\ animal^{-1}$ )

$MS_{H_e}$ : materia seca de heces ( $g\ d^{-1}\ animal^{-1}$ )

El inóculo ruminal usado para las determinaciones indicadas en las secciones 5.5.4 y 5.5.5, se obtuvo de borregos machos de la raza Dorpper con cánula ruminal, adaptados por 20 d a la DSE.

### 5.5.6. Digestibilidad aparente del alimento

La cantidad de heces excretadas ( $g\ d^{-1}\ animal^{-1}$ ) se estimó mediante la técnica del contenido de cenizas insolubles en ácido (Van Keulen & Young, 1977) del alimento consumido y de heces, para lo cual, cinco gramos de muestra seca fueron colocados en crisoles de 50 mL de capacidad, pesados previamente,

estos crisoles con las muestras fueron colocados en una mufla a 600 °C por 5 h; posteriormente se enfriaron en el desecador por 4 h y se les agregó 30 mL de HCl (2N) a las cenizas residuales en los crisoles, los cuales se dejaron en ebullición por 5 minutos. Posteriormente se filtró en caliente el contenido de los crisoles a través de papel filtro Whatman541 previamente pesado. Los papeles filtro con la ceniza insolubles fueron secados por 24 horas a 95 °C en la estufa de aire forzado y se pesaron para obtener por diferencia de pesos la cantidad de ceniza insolubles. El porcentaje de cenizas ácido insoluble para el alimento consumido y heces se calculó con la Fórmula 5:

$$\% \text{ cenizas insolubles en ácido} = \frac{(\text{peso crisol} + \text{cenizas})}{(\text{peso crisol} + \text{muestra})} \times 100 \text{ ----- Fórmula 5}$$

El consumo de cenizas insolubles en ácido (CIAc) por borrego, se calculó a partir del consumo de MS diaria de alimento y el porcentaje de cenizas insolubles en ácido para cada dieta. La producción de heces (Phe) se estimó dividiendo el CIAc entre las cenizas insolubles en ácido para las heces (CIAe), de acuerdo con la Fórmula 6:

$$\text{Phe} = \frac{\text{CIAc}}{\text{CIAe}} \text{ ----- Fórmula 6}$$

Dónde:

Phe=producción de heces (g d<sup>-1</sup> borrego<sup>-1</sup>).

CIAc=Consumo diario de CIA por cordero (g d<sup>-1</sup> borrego<sup>-1</sup>).

CIAe=cenizas en heces (g g<sup>-1</sup> de heces).

### 5.5.7. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos fueron ejecutados con el paquete SAS (Statistical Analysis System, V. 9.2; 2013), se realizaron Análisis de Varianza (ANOVA) (Proc GLM; SAS, 2013) considerando diseños en bloques al azar (DBA), en donde se evaluaron los efectos del tipo de dieta (DSE, DEM, DEN10 y DEN20) y el período

de evaluación (30-45 y 46-60; Modelo 1). Las medias fueron comparadas con la diferencia mínima significativa (DMS;  $p < 0.05$ ) y se obtuvieron correlaciones simples entre las variables de respuesta (correlaciones de Pearson; Proc Corr; SAS, 2004).

$$Y = B_i + D_j + T_k + (D*T)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \text{ ----- Modelo 1}$$

Donde:

Y= Consumo, AFF, DigA, DIV, IIA, IPCG, %CH<sub>4</sub>, ISFF

B<sub>i</sub>= efecto del i-ésimo bloque

D<sub>j</sub>= efecto de la j-ésima dieta

T<sub>k</sub>= efecto del k-ésimo tiempo

(D\*T)<sub>jk</sub>= interacción entre factores

ε<sub>ijk</sub>= error aleatorio

## 5.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.6.1. Análisis de varianza y media diferencia significativa

El consumo diario de alimento vario de 0.83 a 1.16 kg (Cuadro 4). Velásquez-Vélez et al. (2022) y Vázquez-Mendoza (2016) encontraron consumos de alimento similares a los hallados en la presente investigación, en borregos alimentados con una dietas que contenían 25 o 50 % de ensilado de pulpa de naranja, y ensilado de maíz, ensilado de nopal o ensilado de nopal-tuna, respectivamente. En la presente investigación se encontró interacción dieta\*período ( $p < 0.01$ ; Cuadro 5) sólo para consumo, DigA e ISFF. El consumo diario en el período de 46 a 60 d aumentó 7.07, 21.83 y 17.78 % en los borregos alimentados con la DSE, DEM y DEN10, respecto al período de 31 a 45 d, pero disminuyó 1.2 % ( $p < 0.05$ ) en los borregos alimentados con la DEN20.

La DigA varió entre 68.71 y 80.94 % (Cuadro 5). Miranda et al. (2018) reportan digestibilidades aparentes en borregos alimentados con ensilados de nopal o de nopal-tuna de 52.3 y 54.8 %. La interacción encontrada en la presente investigación mostró que, para el período de 46 a 60 d, la DigA fue 14.44, 8.11 y 41.13 % mayor en los borregos alimentados con las DEM, DEN10 y DEN20 y 5.78 % menor con la DSE respecto al período 31 a 45 d. La interacción también mostró que la DigA en el período de 31 a 45 d fue igual entre dietas en tanto que en el período de 46 a 60 d incrementó linealmente respecto a la DSE<DEM<DEN10<DEN20 ( $R^2=0.99$ ), lo cual puede atribuirse a que el nopal y tuna aportan polisacáridos del mucilago y pectina los cuales pueden ser considerados como carbohidratos de reserva más fermentables que la celulosa o almidón contenida en el maíz (Zenteno-Ramírez et al., 2014).

Se observó que los borregos alimentados con la DEM tuvieron menor ISFF ( $p<0.05$ ) en el período 46 a 60 d con respecto a de 30 a 45 d, siendo más notorio para las DEN10 y DEN20 (Cuadro 4).

**Cuadro 5.** Efecto de la dieta y el período de engorda de borregos en el consumo, digestibilidad aparente (DigA) e indicador de selectividad de la fracción fermentable (ISFF).

Dieta	Período	Consumo	AFF	DigA	SIV	IIA	IPCG	CH <sub>4</sub>	ISFF
		kg	g kg <sup>-1</sup> alimento	%	g kg <sup>-1</sup> alimento	eq CO <sub>2</sub>	hL CO <sub>2</sub> eq	L animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	dL animal <sup>-1</sup>
DSE	36-45	1.13	590.6	70.76	200.38	6.31	10.9	42.14	75.6
	46-60	1.21	629.0	66.67	260.63	5.41	10.63	40.46	85.23
DEM	36-45	0.87	547.5	67.38	195.55	6.17	8.25	31.75	125.29
	46-60	1.06	579.3	77.11	272.74	4.67	8.02	28.84	91.35
DEN 10	36-45	0.9	550.5	77.79	239.77	6.03	7.98	30.58	76.52
	46-60	1.06	583.4	84.10	255.6	4.22	6.72	23.33	113.25
DEN 20	36-45	0.84	526.2	64.96	320.31	5.37	7.84	29.4	79.82
	46-60	0.83	595.6	91.68	328.46	3.97	5.52	17.97	106.55
R <sup>2</sup>		0.85	0.38	0.97	0.23	0.44	0.66	0.6	0.63
CV (%)		6.16	12.6	2	36.94	20.07	25.89	31.23	16.23
----- P -----									
Dieta		<0.0001	0.068	<0.0001	0.0027	0.0019	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Tiempo		<0.0001	0.004	<0.0001	0.042	<.0001	0.0214	0.0037	0.0023
Dieta * Tiempo		<0.0001	n/s	<0.0001	n/s	n/s	n/s	n/s	<0.0001

Consumo, alimento consumido por los animales; AFF, asimilación de la fracción fermentable del alimento; DigA, digestibilidad aparente; SIV, selectividad *in vitro*; IIA, indicador de impacto ambiental; IPCG, índice potencial de calentamiento global; CH<sub>4</sub>, producción de metano; IS, índice de selectividad; n/s: no significativo.

No se halló interacción Dieta\*Período ( $p>0.05$ ) para AAF, SIV, IIA, IPCG y CH<sub>4</sub>, pero si hubo efecto de factores principales (dieta o período; Cuadro 4). Con respecto a la dieta se observó que la DSE tuvo una mayor AFF ( $p<0.05$ ) en comparación a DEM, DEN10 y DEN20 (Cuadro 5). La AFF es un indicador de los gramos del sustrato fermentado por kilogramo de alimento consumido. Actualmente no existen referencias de la AFF en la literatura científica con las cuales comparar los datos obtenidos en el presente trabajo. Aunque De Azevedo et al. (2021), Kazemi-Bonchenari et al. (2022) y Sileshi et al. (2021) consideran que el nivel de proteína y energía del alimento es determinante en la eficiencia de utilización del alimento por los rumiantes y la microbiota ruminal, pero se

espera también que la AFF este afectada por la composición de carbohidratos que contenga la dieta así como del comportamiento alimenticio de animal como respuesta a la dieta ofrecida. Esto explica en parte la mayor SIV ( $p < 0.05$ ) de la DEN20 con respecto a la DSE, DEM y DEN10, ya que para tratar de cubrir sus requerimientos energéticos el borrego seleccionará lo más fermentable.

**Cuadro 6.** Efecto de la dieta en la asimilación de la fracción fermentable selectividad e indicadores de impacto ambiental.

Dieta	Indicadores de Impacto Ambiental				
	AFF	SIV	IIA	IPCG	CH <sub>4</sub>
		g kg <sup>-1</sup>	eq CO <sub>2</sub>	dL CO <sub>2</sub> eq	L animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
DSE	609.76 <sup>a</sup>	230.50 <sup>b</sup>	5.85 <sup>a</sup>	10.76 <sup>a</sup>	41.29 <sup>a</sup>
DEM	563.40 <sup>b</sup>	234.14 <sup>b</sup>	5.41 <sup>ab</sup>	8.13 <sup>b</sup>	30.29 <sup>b</sup>
DEN 10	566.96 <sup>b</sup>	247.68 <sup>b</sup>	5.12 <sup>bc</sup>	7.35 <sup>bc</sup>	26.95 <sup>bc</sup>
DEN 20	560.92 <sup>b</sup>	324.39 <sup>a</sup>	4.66 <sup>c</sup>	6.68 <sup>c</sup>	23.68 <sup>c</sup>
<b>DMS</b>					
0.05=	41.44	54.94	0.61	1.22	5.48

Consumo, alimento consumido por los animales; AFF, asimilación de la fracción fermentable del alimento; DigA, digestibilidad aparente; SIV, selectividad *in vitro*; IIA, indicador de impacto ambiental; IPCG, índice potencial de calentamiento global; CH<sub>4</sub>, producción de metano; IS, índice de selectividad. <sup>abcd</sup> medias en la misma columna con distinta literal son diferentes.

La DigA varió entre 68.71 y 80.94 %, encontrando diferencias ( $p < 0.05$ ), siendo la DEN10 y DEN20 las que mayor DigA presentaron.

El IIA fue menor ( $p < 0.05$ ) con la DEN20 al causado por la DSE, DEM Y DEN10, Lazalde-Cruz (2021) encontró un IIA promedio de 4.35 en dietas para ovinos en engorda, conteniendo 0, 5, 10, 15, 20 y 25 % de grano de jamaica. Es posible comparar el IIA de otros sustratos, a partir de la determinación del volumen total de gas y del metano producido, para Wencelová et al. (2015) se podría calcular un IIA de 1.75 con una dieta con semilla de girasol, de 1.64 con extracto de planas medicinales y de 1.89 con una dieta testigo, mientras que para Maleki et al. (2014)

en dietas con alto contenido de forraje y semilla de granada, se puede calcular un IIA que disminuyendo de 3.22, 3.26 y 1.84 conforme aumentó la semilla de granada, De la Rosa- Zariñana et al. (2023) reporta valores de entre 3.3 a 3.9 eq CO<sub>2</sub> en dietas con diferentes niveles de energía y proteína en dietas para ovinos, encontrando que todos los investigadores obtuvieron IIA menores a los del presente trabajo.

El valor del IPCG varió de 6.68 a 10.76 dL CO<sub>2</sub> eq, la variación del CH<sub>4</sub> fue de 23.68 a 41.29 L animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, ambas variables tuvieron diferencias ( $p < 0.05$ ) entre dietas, siendo DSE la más alta en la producción de gases de efecto invernadero ( $p < 0.05$ ), sin encontrar diferencias para DEM, mientras que DEN20 fue la dieta con el menor IPCG ( $p < 0.05$ ).

Las variables IIA, IPCG y CH<sub>4</sub>, están relacionadas con el balance de energía – proteína de las dietas. Los valores más altos en las dietas DSE DEM DEN10 se deba quizá a la disponibilidad de los carbohidratos, DEN20 al tener mayor cantidad de ensilado de nopal y al ser más digestible, pudo proporcionar esos carbohidratos necesarios para una correcta fermentación de la fibra, al llevarse a cabo el debilitamiento de la fibra debido al proceso de ensilaje.

Molina-Botero et al (2013) y Archiméde et al (2016) mencionan que el tipo de carbohidratos disponible en la dieta determina la tasa de pasaje del alimento, afectando la producción de CH<sub>4</sub> por animal. Así mismo, el tipo de carbohidrato (de rápida, media y lenta asimilación) puede ser un factor determinante en la producción de CH<sub>4</sub>, puesto que puede limitar la disponibilidad de los carbohidratos digeribles (Eugene et al., 2004).

El IPCG es útil en la estimación del impacto ambiental, proveniente de la digestión y fermentación *in vitro* de los alimentos ofrecidos a los rumiantes, siendo afectado por los diferentes niveles de energía dentro de la dieta (Martínez-Hernández et al., 2019). El experimento realizado por Lazalde-Cruz (2021), en donde usa dietas con diferentes niveles de inclusión de grano de jamaica, reporta un IPCG de entre 7.3 a 8.5 hL CO<sub>2</sub> eq, por otra parte, De la Rosa- Zariñana et al. (2023)

reportan IPCG de 6.9 a 8.09 hL CO<sub>2</sub> eq, en dietas con diferentes niveles de energía y proteína, ambos resultados son similares a los encontrados en la presente investigación, en donde se tienen valores de IPCG de entre 6.68 a 10.76 hL CO<sub>2</sub> eq.

El efecto ( $p < 0.05$ ) del período de engorda en AFF, IIA, IPCG, CH<sub>4</sub> y SIV se muestra en el Cuadro 7. Se observó que tanto la AFF como el SIV fueron 7.97 % y 16.88 % mayores ( $p < 0,05$ ) en el período 46 a 60d con respecto al período 36 a 45d lo que indicó que animales más desarrollados fisiológicamente fermentan y aprovechan mejor la fracción fermentable del alimento. Hristov et al. (2019) mencionan que la población microbiana del rumen es capaz de adaptarse al tipo de dieta ofrecida a través del tiempo.

Por su parte el IIA, IPCG y CH<sub>4</sub> fueron menores ( $p < 0.05$ ) en el período de 46 a 60 d respecto al de 36 a 45 d, lo cual fue asociado a una mayor AFF, como ya se indicó en el anterior párrafo. En la producción de CH<sub>4</sub> se encontró diferencia de 5.82 L animal<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Rasmussen y Harrison (2011) mencionan que la producción de CH<sub>4</sub> incrementa con el aumento de fibra de baja digestibilidad en la dieta, o por un desbalance en la proporción de energía - proteína, inclusive por el contenido de compuestos secundarios anti nutricionales en la dieta (Jiménez-Santiago et al., 2019).

### **5.6.2. Correlaciones de Pearson**

Las correlaciones simples entre las variables (Cuadro 7), mostraron que la AFF tiene una correlación positiva con el consumo y la SIV ( $R=0.32$  y  $R=0.48$ ;  $p < 0.002$ ), mientras que el IS evaluado *in vivo* correlacionó negativamente con el consumo ( $R=-0.32$ ;  $p < 0.002$ ).

**Cuadro 7.** Comportamiento de las variables *in vitro* e *in vivo* con respecto al tiempo de engorda.

Días	AFF	SIV	IIA	IPCG	CH <sub>4</sub>
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup> alimento	eq CO <sub>2</sub>	hL CO <sub>2</sub> eq	L animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
45	553.70 <sup>b</sup>	239 <sup>b</sup>	5.97 <sup>a</sup>	8.74 <sup>a</sup>	33.47 <sup>a</sup>
60	596.83 <sup>a</sup>	279.36 <sup>a</sup>	4.57 <sup>b</sup>	7.72 <sup>b</sup>	27.65 <sup>b</sup>
DMS 0.05=	29.3	38.35	0.43	0.86	3.87

Consumo, alimento consumido por los animales; AFF, asimilación de la fracción fermentable del alimento; DigA, digestibilidad aparente; DIV, digestibilidad *in vitro*; IIA, indicador de impacto ambiental; IPCG, índice potencial de calentamiento global; CH<sub>4</sub>, producción de metano; IS, índice de selectividad. <sup>abcd</sup> medias en la misma columna con distinta literal son diferentes.

Por otra parte, el IIA, IPCG y CH<sub>4</sub> correlacionaron negativamente con la DigA (R=-0.45, -0.33 y -0.38, respectivamente;  $p < 0.001$ ), lo cual se atribuyó a que la producción de CH<sub>4</sub> se da con dietas altas en forraje menos digestibles, debido a que fomentan la actividad y crecimiento de las bacterias fibrolíticas del rumen, principales productoras de los precursores (H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) para la síntesis de CH<sub>4</sub> en el rumen (Vélez-Terranova et al., 2014). El IPCG correlacionó positivamente con el consumo y la AFF ( $p < 0.001$ ), lo cual se atribuyó a que en el cálculo del IPCG se considera el volumen proporcional de cada gas de efecto invernadero producido en el rumen (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) respecto al Vm de gas total, y éste es mayor cuanto más consume o cuanta más fracción fermentable asimile el borrego.

El IPCG, CH<sub>4</sub> e IIA correlacionaron positivamente ( $p < 0.001$ ) como se esperaba dado que se calcularon a partir de la producción de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

**Cuadro 8.** Correlaciones entre las variables del cálculo de índice potencial de calentamiento global con la TPG con las variables in vivo.

	AFF	DigA	SIV	IIA	IPCG	CH <sub>4</sub>	IS
Consumo	0.32	-0.14	0.02	0.06	0.36	0.35	-0.32
	0.002	0.18	0.86	0.58	0.0003	0.0004	0.002
AFF		0.12	0.48	-0.11	0.42	0.37	0.06
		0.25	<.0001	0.31	<.0001	0.0002	0.59
DigA			0.23	-0.45	-0.33	-0.38	0.18
			0.03	<.0001	0.001	0.0001	0.08
SIV				-0.24	0.04	NE	-0.19
				0.02	0.73		0.06
IIA					0.43	0.54	-0.19
					<.0001	<.0001	0.06
IPCG						0.99	0.02
						<.0001	0.83
CH <sub>4</sub>							-0.01
							0.92

Consumo, alimento consumido por los animales; AFF, asimilación de la fracción fermentable del alimento; DigA, digestibilidad aparente; SIV; selectividad *in vitro*; IIA, indicador de impacto ambiental; IPCG, índice potencial de calentamiento global; CH<sub>4</sub>, producción de metano; IS, índice de selectividad.

## 5.7. CONCLUSIONES

Los animales que reciben una dieta con ingredientes nutricionales de calidad, balanceada y con buena degradabilidad ruminal, generan menor impacto ambiental derivado de la emisión de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>; en tanto que el uso de los IIA e IPCG resultan útiles para integrar los conceptos de digestibilidad aparente e índice de selectividad durante la evaluación de dietas formuladas con ingredientes no convencionales. Con el índice potencial de calentamiento global indica se puede tener una idea sobre el posible impacto al medio ambiente que puede generar cada gramo de MS de alimento fermentado en el rumen; además,

es un estimador del calentamiento global, ya que para realizar el cálculo de IPCG, se considera el CO<sub>2</sub> eq del metano y bióxido de carbono producido en conjunto.

## 5.8. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Yáñez, M. I., Hernández-Mendo, O., Guerrero-Legarreta, I., Ramírez-Bribiesca, J. E., Aranda-Osorio, G., & Crosby-Galván, M. M. (2011). Productive response of lambs fed with fresh or dehydrated spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, 23–35.
- Andrade-Montemayor, H. M., Cordova-Torres, A. V., García-Gasca, T., & Kawas, J. R. (2011). Alternative foods for small ruminants in semiarid zones, the case of Mesquite (*Prosopis laevigata* spp.) and Nopal (*Opuntia* spp.). *Small Ruminant Research*, 98(83–92).
- Archimède, H., Rira, M., Barde, D. J., Labirin, F., Marie-Magdeleine, C., Calif, B., Periacarpin, F., Fleury, J., Rochette, Y., Morgavi, D. P., & Doreau, M. (2016). Potential of tannin-rich plants, *Leucaena leucocephala*, *Glyricidia sepium* and *Manihot esculenta*, to reduce enteric methane emissions in sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* ;(100):1149–1158.
- Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., & McAllister, T. A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 21. <https://doi.org/10.1071/EA07199>
- Bhatta, R., Tajima, K., Takusari, N., Higuchi, K., Enishi, O., & Kurihara, M. (2006). Comparison of sulfur hexafluoride tracer technique, rumen simulation technique and in vitro gas production techniques for methane production from ruminant feeds. *International Congress Series*, 1293, 58–61. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.03.075>
- Castelán-Ortega, O. A., Carlos Ku-Vera, J., & Estrada-Flores, J. G. (2014). Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmósfera*, 27(2), 185–191. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71109-9](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71109-9).
- Coca-Sinova A., Mateos, G. G., González-Alvarado J. M., Centeno, C., Lazaro, R. & Jimenez-Moreno, E. (2011). Comparative study of two analytical procedures for the determination of acid insoluble ash for evaluation of nutrient retention in broilers. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 761-768.
- De Azevedo, E. B., Savian, J. V., do Amaral, G. A., de David, D. B., Gere, J. I., Kohmann, M. M., Bremm, C., Jochims, F., Zubieta, A. S., Gonda, H. L., Bayer, C., & de Faccio Carvalho, P. C. (2021). Feed intake, methane yield, and efficiency of utilization of energy and nitrogen by sheep fed tropical

- grasses. *Tropical Animal Health and Production*, 53(5), 452. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02928-4>
- De la Rosa- Zariñana, A. E., Miranda-Romero, L. A., Martínez-Hernández, P. A., Vargas-Villamil, L. M., & Elmasry, A. (2023). Nivel de proteína y energía en la fermentación in vitro de dietas para borregos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3545>
- Eugene M, Archimède H., & Sauvant, D. (2004). Quantitative metanalysis on the effects of defaunation of the rumen on growth, intake and digestion in ruminants, *Livestock Production Science*;85:81-97.
- Eugène, M., Sauvant, D., Nozière, P., Viillard, D., Oueslati, K., Lherm, M., Mathias, E., & Doreau, M. (2019). A new Tier 3 method to calculate methane emission inventory for ruminants. *Journal of Environmental Management*, 231, 982–988. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.086>
- Gebremariam, T., Melaku, S., & Yami, A. (2006). Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility, and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 131(1–2), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.02.003>
- González, A., & Carlsson-Kanyama, A. (2007). Emisiones de gases de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global: el sector agropecuario. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 7–14.
- Hill, J., McSweeney, C., Wright, A.-D. G., Bishop-Hurley, G., & Kalantar-zadeh, K. (2016). Measuring methane production from ruminants. *Trends in Biotechnology*, 34(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.10.004>
- Jiménez-Santiago, A., Jiénez-Farrer, G., Alayón-Gamboa, A., Pérez-Luna, E. de J., Piñeiro-Vázquez, A. T., Albores-Moreno, S., Pérez-Escobar, M. G., & Castro-Chan, R. (2019). Fermentación ruminal y producción de metano usando la técnica de gas in vitro en forrajes de un sistema silvopastoril de ovinos de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(2), 298–314. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4529>
- Kazemi-Bonchenari, M., Khanaki, H., Jafari, A., Eghbali, M., Poorhamdollah, M., & Ghaffari, M. H. (2022). Milk feeding level and starter protein content: Effects on growth performance, blood metabolites, and urinary purine derivatives of Holstein dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 105(2), 1115–1130. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21208>
- Lazalde-Cruz, R. (2021). Calidad química-fermentativa del esquileo y grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) para la engorda de ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Estado de México. P 113.

- Lopez-Hernandez, P. (2012). Suplementación con ensilado de nopal (*Opuntia spp.*) en caprinos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Maleki, E., Meng, G. Y., Faseleh Jahromi, M., Jorfi, R., Khoddami, A., & Ebrahimi, M. (2014). Pomegranate seed oil rich in conjugated linolenic acids reduces in vitro methane production. *South African Journal of Animal Science*, 46(3), 325–335. <https://doi.org/10.4314/sajas.v46i3.13>
- Martínez-Hernández, B. E., Salvador-Flores, O., & Miranda-Romero, L. A. (2019). Indicador de calentamiento global a partir de la fermentación ruminal de alimentos con diferentes niveles de energía y proteína. *Pastos y Forrajes*, 42, 285–289.
- Miranda-Romero, L. A., Vázquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., & Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 196–215.
- Molina-Botero, C., Cantet, J., Montoya, S., Correa-Londoño, G., & Barahona-Rosales, R. (2013). In vitro methane production from two tropical grasses alone or in combination with *Leucaena leucocephala* or *Gliricidia sepium*. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*; (8):15–31.
- Pérez-Barbería, F. J. (2017). Scaling methane emissions in ruminants and global estimates in wild populations. *Science of The Total Environment*, 579, 1572–1580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.175>
- Pitt, R. E., Cross, T. L., Pell, A. N., Schofield, P., & Doane, P. H. (1999). Use of in vitro gas production models in ruminal kinetics. *Mathematical Biosciences*, 159(2), 145–163.
- Ramin, M., & Huhtanen, P. (2012). Development of an in vitro method for determination of methane production kinetics using a fully automated in vitro gas system—A modelling approach. *Animal Feed Science and Technology*, 174(3–4), 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.03.008>
- Rasmussen, J., & Harrison, A. (2011). The benefits of supplementary fat in feed rations for ruminants with particular focus on reducing levels of methane production. *ISRN Veterinary Science*, 2011, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2011/613172>
- Rojas-Valencia, M. N. (2011). Manejo Integral de Residuos Sólidos, impacto ambiental y costos. *Ingeniería Civil*, 477, 12–16.
- Russell, J. B., & Rychlik, J. L. (2001). Factors That Alter Rumen Microbial Ecology. *Science*, 292(5519), 1119–1122. <https://doi.org/10.1126/science.1058830>
- Sileshi, G., Mitiku, E., Mengistu, U., Adugna, T., & Fekede, F. (2021). Effects of dietary energy and protein levels on nutrient intake, digestibility, and body weight change in Hararghe highland and Afar sheep breeds of Ethiopia.

*Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 8(2), 185.  
<https://doi.org/10.5455/javar.2021.h501>

- Static Analisis Sistem, S. (2013). *Static Analisis Sistem* (No. 2004).
- Surayah Osman, N., Sapawe, N., Adhwa'Uthaqif Sapuan, M., Farhan Mohd Fozi, M., Haikal Iskandar Fakhru Azman, M., Harith Zafrul Fazry, A., Zafri Haiqal Zainudin, M., & Farhan Hanafi, M. (2018). Sunflower shell waste as an alternative animal feed. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 21905–21910. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.049>
- Tirado-Estrada, G., Ramos-Mijangos, L. M., Miranda- Romero, L. A., Tirado-González, D. N., Salem, A. Z. M., & Mlambo, V., Medina-Cuéllar, S. E., González-Reyes, M., y Barababosa, P. A. (2018). Potential impacts of dietary Lemna gibba supplements in a simulated ruminal fermentation system and environmental biogas production. *Journal of Cleaner Production*, 181(1), 555–561, [doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.120](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.120).
- Ugbogu, E. A., Elghandour, M. M. M. Y., Ikpeazu, V. O., Buendía, G. R., Molina, O. M., Arunsi, U. O., Emmanuel, O., & Salem, A. Z. M. (2019). The potential impacts of dietary plant natural products on the sustainable mitigation of methane emission from livestock farming. *Journal of Cleaner Production*, 213, 915–925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.233>
- Van Keulen, J., & Young, B. A. (1977). Evaluation of Acid-Insoluble Ash as a Natural Marker in Ruminant Digestibility Studies. *Journal of Animal Science*, 44(2), 282–287. <https://doi.org/10.2527/jas1977.442282x>
- Vázquez-Mendoza, P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, p 109.
- Velásquez-Vélez, R., Esquivel-Mimenza, H., Montero-Canul, L., & Kun-Vera, J. (2022). Engorda de corderos Pelibuey con ensilaje de pulpa de naranja Citrus sinensis L. en jaulas elevadas. *Revista Colombiana de Cienciaa Animal*, 5, 67–71. <https://revistas.ut.edu.co/index.php/ciencianimal/article/view/127>
- Vélez-Terranova, M., Compos-Gaona, R., & Sánchez-Guerrero, H. (2014). Uso de metabolitos secundarios de las plantas para reducir la metanogénesis ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17, 489–499.
- Wanapat, M., Cherdthong, A., Phesatcha, K., & Kang, S. (2015). Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability. *Animal Nutrition*, 1(3), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.07.004>
- Wencelová, M., Váradyová, Z., Mihalíková, K., Čobanová, K., Plachá, I., Pristaš, P., Jalč, D., & Kišidayová, S. (2015). Rumen fermentation pattern, lipid metabolism and the microbial community of sheep fed a high-concentrate diet supplemented with a mix of medicinal plants. *Small Ruminant Research*, 125, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.01.028>

Zenteno-Ramírez, G., Juárez-Flores, B. I., Aguirre-Rivera, J. R., Ortiz-Pérez, M. D., Zamora-Pedraza, C., & Rendón-Huerta, J. A. (2014). Evaluación de azúcares y fibra soluble en jugo de variantes de tunas (*Opuntia spp.*). *Agrociencia*, 48, 141–152

## 6. COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE OVINOS ALIMENTADOS CON ENSILADO DE NOPAL (*OPUNTIA SPP*) Y JAMAICA (*HIBISCUS SABDARIFFA*)

### 6.1. RESUMEN

Los sistemas de producción de carne ovina en México se caracterizan ser de baja tecnificación y por tener animales con baja capacidad productiva, debido a esto, los productores buscan alimentos de bajo costo, optando por el uso de subproductos agrícolas de buena calidad nutricional. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento productivo de ovinos en engorda intensiva alimentados con ensilado compuesto de nopal (*Opuntia spp*) – tuna (*Opuntia spp*) – grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*), en comparación con una dieta convencional alta en concentrado. Para ello se alimentaron 24 borregos machos criollos con cuatro dietas balanceadas: dieta sin ensilado (DSE; testigo); dieta con 10 % de ensilado de maíz (DEM); y dietas con 10 y 20 % de ensilado de nopal (DEN10 y DEN20). En un experimento establecido en bloques al azar (DBA) con arreglo de dos factores (tiempo y dieta) se evaluaron la ganancia de peso a 60 d (GP), ganancia diaria de peso (GDP), consumo de materia seca (CMS) y conversión alimenticia (CA) a los 30, 45 y 60 d. La interacción dieta\*tiempo influyó en el CMS ( $p<0.03$ ). Peso y CA tuvieron diferencias entre dietas ( $p<0.003$ ). Se encontraron diferencias en el peso final para DSE y DEN20 (3.81 kg,  $p<0.05$ ). El CMS fue mayor para DSE con respecto a DEM, DEN10 y DEN20 (2.06 a 3.09 kg de alimento,  $p<0.05$ ). La mejor GDP se encontró a los 60 d ( $p<0.05$ ) siendo 116 y 99 g mayor que la GDP a los 30 y 45 d, respectivamente. La inclusión de ensilado compuesto de nopal-tuna-grano de jamaica, en una dieta integral, no muestran ninguna desventaja, por lo que, el uso de ensilado compuesto de nopal debe ser considerado por los pequeños y medianos productores como una opción para la alimentación de borregos.

**Palabras clave:** subproductos agrícolas, producción de ovinos, nutrición de ovinos.

# PRODUCTIVE PERFORMANCE OF SHEEP FED WITH CACTUS (*OPUNTIA SPP*) AND HIBISCUS (*HIBISCUS SABDARIFFA*) SILAGE

## ABSTRACT

Sheep meat production systems in Mexico are characterized by low technology and by having animals with low productive performance. As a result, producers seek low-cost feed, opting for the use of agricultural by-products of good nutritional quality. The objective of the present work is to evaluate the productive behavior of sheep in intensive fattening fed with silage composed of cactus (*Opuntia spp*) - prickly pear (*Opuntia spp*) - hibiscus grain (*Hibiscus sabdariffa*), in comparison with a conventional diet high in concentrate. For this purpose, 24 male criollo sheep were fed with four balanced diets: diet without silage (DSE; control); diet with 10 % corn silage (DEM); and diets with 10 and 20 % cactus silage (DEN10 and DEN20). In an experiment established in randomized blocks (RB) with a two-factor arrangement (time and diet), weight gain at 60 d (WG), daily weight gain (DWG), dry matter intake (DMI) and feed conversion (FC) at 30, 45 and 60 d were evaluated. The interaction diet\*time influenced DMI ( $p<0.03$ ). Weight and FC had differences between diets ( $p<0.003$ ). Differences in final weight were found for DSE and DEN20 (3.81 kg,  $p<0.05$ ). The DMI was higher for DSE with respect to DEM, DEN10 and DEN20 (2.06 to 3.09 kg of feed,  $p<0.05$ ). The best GDP was found at 60 d ( $p<0.05$ ) being 116 and 99 g higher than DWG at 30 and 45 d respectively. The inclusion of cactus- prickly pear- hibiscus grain silage in an integrated diet did not show any disadvantage, so the use of cactus silage should be considered by small and medium producers as an option for sheep feeding.

**Key words:** agricultural by-products, sheep production, sheep nutrition.

## 6.2. INTRODUCCIÓN

En el 2022 la producción de carne de ovino en México fue de 67 mil toneladas (SIAP, 2023), con un consumo nacional per cápita de 500 g año<sup>-1</sup>. El 69.6 % de la producción nacional se realiza en los estados de México, Hidalgo, Veracruz, Jalisco, Puebla, Zacatecas, Tlaxcala, San Luis Potosí, Oaxaca y Guanajuato (SIAP, 2023). México ha tenido que importar de carne y borregos (Bobadilla-Soto et al., 2021) para satisfacer la necesidades que demanda la población (German D.& Mendoza-Martínez et al., 2016). Los sistemas de producción de carne ovina en México se caracterizan por ser de mediana prolificidad, rusticidad y una adaptación al medio que produce una baja tecnificación (Martínez-Dávila et al., 2004), que dependen de subproductos agrícolas o de forrajes de baja calidad, deficientes en minerales, vitaminas, proteína y altos en fibras no aprovechables por los ovinos (De la Rosa- Zariñana et al., 2023), por lo que se buscan tecnologías para mejorar los indicadores productivos sin el aumento de costos por concepto de alimentación (Herrera-Haro et al., 2019).

México es el principal productor de nopal - verdura y tuna, cuyos sistemas intensivos de producción generan grandes cantidades de cladodios de desecho, derivados de la poda para el manejo sanitario y de rejuvenecimiento de las plantas de nopal (Aranda O. et al., 2008), generando hasta 10 t ha<sup>-1</sup> de nopal maduro (Aranda, Segundo, Flores & Cruz, 2008). También se encuentra el desecho de nopal y tuna que no logra comercializarse, la cual se estima en 83,784 t. La acumulación y mal manejo de tales desechos del cultivo del nopal ocasiona un impacto negativo por contaminación al ambiente (Yepes, Montoya & Orozco, 2008). El grano de jamaica también es un subproducto de la actividad agrícola derivado de la producción de la flor de jamaica. Por su alta proporción de materia seca, proteína y extracto etéreo (92.5, 20.5 y 17.9 %, respectivamente), el grano de la jamaica puede ser una fuente potencial de nutrientes concentrados, para la alimentación ovinos (Jínez, Cortes, Ávila, Casaubon & Salcedo, 1998).

Entre las tecnologías para el manejo y uso de nopal como alimento para ovinos, se ha investigado la elaboración y formulación de bloques multinutricionales (Mejía-Haro, Delgado-Hernández, Guajardo-Hernández & Valencia-Pozada, 2011), el deshidratación y molido (Díaz-Ayala, Álvarez-García & Sima-Moo, 2015), la fermentación sólida y semisólida (Pandey, 2003) y, el ensilaje (Vázquez-Mendoza, 2016). Este último es una alternativa tecnológica potencial para el manejo y uso del nopal enriquecidos con semilla de jamaica, en el cual se aprovecha el alto contenido de humedad (Miranda-Romero et al., 2018), por lo que el objetivo de la presente investigación fue evaluar el comportamiento productivo de ovinos alimentados con ensilado de nopal–tuna–grano de jamaica.

### **6.3. MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **6.3.1. Localización**

El estudio se realizó en el módulo de ovinos de la Granja Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo localizado entre las coordenadas 19 ° 29 ' latitud norte, 98 ° 54 ' longitud oeste, a 2240 msnm, con temperatura media anual de 15.9 °C y precipitación media anual de 645 mm; mientras que, el análisis de las muestras de alimento, se realizaron en los laboratorios de Microbiología Pecuaria y Nutrición de Rumiantes del Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.

#### **6.3.2. Elaboración de los ensilados**

El material vegetal utilizado para los ensilados fue de subproductos de diferentes sistemas agrícolas, en el caso del nopal y tuna fueron proporcionado por productores de Otumba, Estado de México. El nopal fue de la variedad platanillo, fue nopal maduro derivado de una poda de rejuvenecimiento del cultivo, en el caso de la tuna, fue un producto de tercera, que no se podía comercializar, y que se iba a desechar en los campos de producción (sin tratamien), la semilla de jamaica fue comprada a productores de la zona de Iguala, estado de Guerrero. Para la realización del ensilado la tuna, el nopal y el rastrojo de avena fueron

picados a un tamaño de partícula de 2.5 a 5 cm aproximadamente, posteriormente se mezclaron los ingredientes: 64 % de nopal, 11 % de tuna, 10 % de grano de jamaica y 15 % de rastrojo de avena, la mezcla fue compactado con ayuda del peso de una persona, en tambos de plástico de 200 L. Al finalizar la compactación, los tambos contuvieron 160 kg de material vegetal, alcanzando una densidad de  $650 \text{ kg m}^{-3}$ . Una vez que se llenaron los tambos se taparon con plástico de calibre para silos y se sellaron herméticamente con cinta adhesiva y con lazos. Se dejó fermentar por 60 d, antes de su uso.

### **6.3.3. Tratamientos y manejo animal**

Los tratamientos consistieron en cuatro dietas formuladas para ser isoprotéicas (15 % PC) e isoenergéticas ( $2.8 \text{ Mcal de EM kg}^{-1}$ ): la dieta testigo o dieta sin ensilado (DSE), dieta con ensilado de maíz (DEM), y dietas con 10 o 20 % de ensilado de nopal (DEN10, DEN20; Cuadro ), con las que se alimentó a 24 borregos (seis por dieta) machos criollos de  $26.9 \pm 3 \text{ kg PV}$ , los cuales fueron manejados con las especificaciones técnicas para la producción pecuaria, así como, para el cuidado y uso de los animales de laboratorio (NOM-062-ZOO) y alojados en corraletas individuales, equipadas con un comedero y un bebedero automático a libre acceso. A su llegada, los borregos fueron identificados, desparasitados (Ivermectina y Clorsulom  $1 \text{ mL}/25 \text{ kg PV}$ ; Iverfull F®) y se vitaminados (vitamina A, D, y E  $1 \text{ mL animal}^{-1}$ ; Vigantol ADE®). Los borregos tuvieron un período de 12 días para su adaptación a la dieta asignada y al manejo, posteriormente se tuvo una fase experimental de 60 días, durante el cual se les ofreció el alimento totalmente mezclado en dos raciones; a las 9:00 y 17:00 h del día.

**Cuadro 1.** Ingredientes y composición nutrimental de dietas formuladas sin ensilado (DSE), con ensilado de maíz (DEM) y con ensilado de nopal-tuna-jamaica (DEN10 y DEN20) para ovinos en engorda.

Ingrediente %	Dieta			
	DSE	DEM	DEN10	DEN20
Paja de avena	16	10	9.5	3
Maíz molido	57.3	56.6	53	39
Maíz rolado	-	-	-	10
Pasta Soya	13.6	13.8	13	12.2
Gluten de maíz	7.6	4.1	9	10.3
Mezcla mineral*	2	2	2	2
Calcio	2	2	2	2
Urea	0.5	0.5	0.5	0.5
Sal	1	1	1	1
Ensilado maíz	-	10	-	-
Ensilado nopal-tuna-jamaica	-	-	10	20
<b>Aporte nutrimental</b>				
MS %	89.7	74.2	74.7	73.3
EM (Mcal/kg <sup>-1</sup> )	2.8	2.8	2.8	2.8
Proteína cruda %	15	15	15	15
FDN %	23.5	23.9	20.7	21.3

\*Vitalal ovino plus: calcio, 24 %; fósforo, 3 %; magnesio, 2 %; sodio, 8 %; cloro, 12 %; potasio, 0.5 %; azufre, 0.5 %; antioxidante, 0.5 %; lasolacida, 2000 ppm; cromo, 5 ppm; manganeso, 4000 ppm; hierro, 2,000 ppm; cinc, 5,000 ppm; yodo, 100 ppm; selenio, 30 ppm; cobalto, 60 ppm; vit. A, 500, 000 UI; vit. D, 150, 000 UI; vit. E, 1, 000 UI.

#### 6.3.4. Variables de comportamiento productivo

Diariamente se pesó el alimento ofrecido y rechazado, para calcular por diferencia, la materia seca de alimento consumido (CMS). La ganancia diaria de peso (GDP) se obtuvo mediante la diferencia del peso inicial y peso final, dividido

entre 60 días que duró la engorda. La conversión alimenticia (CA) fue el resultado del total de alimento consumido en relación con la ganancia diaria de peso:

CA= (alimento consumido, kg / ganancia diaria de peso, kg)

CMS = Alimento ofrecido – Alimento rechazado

$$GDP = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{No. de días de engorda}}$$

$$CA = \frac{\text{Alimento ofrecido} - \text{Alimento rechazado}}{\text{Ganancia Diária de Peso}}$$

### 6.3.5. Análisis estadístico

Se utilizó el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, V. 9.2; 2013) para realizar Análisis de Varianza (ANOVA) (Proc GLM, SAS, 2013) del experimento establecido en un diseño en bloques al azar DBA con arreglo de dos factores (periodo\*dieta), considerando el peso inicial como covariable de acuerdo con el Modelo 1. Se realizaron pruebas de medias utilizando la diferencia mínima significativa (DMS) con  $p < 0.05$ , considerando los errores estándar (EE) obtenidos de un procedimiento mixto (Proc Mixed; (Static Analysis Sistem, 2013).

Modelo 1

$$Y = \mu + B_i + D_j + T_k + (D*T)_{jk} + \text{Cov}_{\beta_1-\beta_0} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y= Peso, GP, GDP, CMS y CA

B<sub>i</sub>= i-ésimo bloque o repetición

D<sub>j</sub>= efecto de la j-ésima dieta

T<sub>k</sub>= efecto del k-ésimo tiempo de medición

$(D*T)_{jk}$ = interacción entre factores

$Cov_{\beta_1-\beta_0}$ = covariable peso inicial

$\varepsilon_{ijk}$ = error aleatorio

#### 6.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontró interacción Período\*Dieta ( $p<0.03$ ) para el CMS, el peso y la CA fue afectada ( $p<0.03$ ) por la dieta, mientras que el período afectó todas las variables ( $p<0.0001$ ) (Cuadro 2). La interacción mostró que el CMS tuvo una tendencia a disminuir linealmente entre dietas en el siguiente orden DSE> DEM> DEN10> DEN20, y fue menor en función del período en el orden siguiente y de acuerdo con la pendiente y el coeficiente de determinación: 16 a 30 d ( $m=-1.1916$ ;  $R^2=0.9615$ ); 31-46 ( $m=-0.957$ ;  $R^2=0.8641$ ) y ( $m=-0.7809$ ;  $R^2=0.5457$ ) Miranda-Romero et al. (2018) obtuvieron CMS de alimento entre 10.5 y 19.5 kg durante 15 días para borregos alimentados con ensilados de nopal y tuna. Velásquez-Vélez et al. (2022) observaron CMS de alimento de 13.53 y 18.37 kg en borregos alimentados con diferentes concentraciones de ensilado de pulpa de naranja. En ambos estudios los CMS de alimento fueron similares a los encontrados en el presente estudio Pereira et al. (2008) reportan CMS alimento con ensilado de maíz de 16.47 kg en borregos, inferior al encontrado en el presente estudio. El bajo consumo del DEN20 puede deberse a la semilla de jamaica presente en el ensilado, Mukhtar (2007) menciona que con un 30 % de grano de jamaica incluido en las dietas de pollos en engorda, reduce el consumo de alimento y causa daños en hígado, debido a los ácidos grasos epoxy-oleico y cyclopropenoide, que se encuentran en la semilla.

La dieta afectó ( $P=0.03$ ) el peso y CA (Cuadro 2), además, se observaron diferencias estadísticas para las variables de GP y GDP a través del tiempo de evaluación ( $p<0.0001$ ).

**Cuadro 2.** Comparación de las variables de producción de borregos medidas a los 30, 45 y 60 días de engorda.

Dieta	Tiempo	Peso	GP	GDP	CMS	CA
	d	kg	kg	g d <sup>-1</sup>	kg alimento	
DSE	30	34.326	3.294	0.22	19.370 <sup>b</sup>	6.59
	45	38.001	3.922	0.262	19.293 <sup>b</sup>	5.586
	60	42.676	4.922	0.328	21.367 <sup>a</sup>	3.592
DEM	30	33.76	4.422	0.295	17.676 <sup>cd</sup>	4.166
	45	37.16	3.322	0.222	17.807 <sup>c</sup>	4.804
	60	42.352	5.114	0.341	18.462 <sup>c</sup>	3.722
DEN10	30	32.881	3.64	0.243	16.440 <sup>d</sup>	4.721
	45	36.631	3.707	0.247	16.455 <sup>d</sup>	4.454
	60	42.289	5.615	0.374	19.275 <sup>b</sup>	3.561
DEN20	30	32.266	3.882	0.259	15.810 <sup>e</sup>	4.549
	45	35.691	3.299	0.22	16.558 <sup>d</sup>	4.989
	60	41.391	5.574	0.372	18.493 <sup>c</sup>	3.608
DMS 0.05		NA	NA	NA	0.85	NA
R2		0.85	0.53	0.53	0.82	0.56
CV (%)		5.79	27.32	27.31	4.77	24.15
----- P -----						
Dieta		<0.0001	0.36	0.36	<0.0001	0.003
Tiempo		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Dieta * Tiempo		0.99	0.519	0.52	0.03	0.13
Cov (Pini)		<0.001	0.017	0.01	0.75	0.11

D, días transcurridos entre muestreos; Peso, peso de los animales a los 30, 45 y 60 días; GP, ganancia de peso promedio por periodo de 15 días; GDP, ganancia diaria de peso; CMS, consumo de materia seca por periodo de 15 días; CA, conversión alimenticia; Pini, peso inicial.

Respecto al Peso se observó que: 1) la inclusión de ensilado ya sea de maíz o nopal, reduce ( $P=0.0001$ ) el peso alcanzado a los 60 días de engorda; 2) que el consumo de DEN10 promueve el mismo peso final que la DEM y 3) que la inclusión de un nivel mayor de ensilado de nopal (DEN20) causa un menor

( $P=0.0001$ ) peso final que la DEM, (Cuadro ), lo que implica mayor tiempo para alcanzar el peso a de venta. El peso final de los borregos fue 11 % superior a los obtenidos por Velásquez-Vélez et al. (2022), quienes engordaron borregos con ensilado de pulpa de naranja (0, 25 y 50 %). Muciño-Castillo et al. (2014) reportan un bajo peso final al alimentar borregos con alto contenido de harina de nopal en la dieta (0, 25 y 50 %), atribuyéndolo a un efecto laxante por el nivel alto de harina de nopal, lo que indica que las concentraciones de ensilado de nopal (10 y 20 %), usadas en la presente investigación, fueron las adecuadas para mantener sano el rumen de los borregos. Lazalde-Cruz (2021), con el uso de subproductos de jamaica y con el uso de propionato, reporta pesos finales de entre 39.57 y 42.49 kg, siendo más altos a los encontrados en el presente trabajo.

A pesar de que el peso final fue inferior para los borregos que fueron alimentados con ensilado de maíz o nopal (DEM, DEN10 o DEN20) en comparación con la DSE, la CA fue mayor con esta última dieta sin ensilado, lo que denota que el uso de ensilado mejora la CA. Además, la GP y GDP no fueron afectadas ( $p>0.05$ ) por la dieta, las cuales variaron entre 0.253 a 0.291 kg d<sup>-1</sup> para GDP y de 3.8 a 4.38 kg en 15 d para GP. Hafez et al. (2012), Malisetty et al. (2013) y Van de Vyver et al. (2014) reportan GDP entre 200 y 322 gramos en borregos con dietas conteniendo diferentes proporciones de ensilado de maíz. Lazalde-Cruz (2021) reporta GP de 3.75 a 4.65 kg en borregos, alimentados con dietas conteniendo cantidades diferentes de propionato de calcio y grano de jamaica, por su parte Mendoza-Martínez et al. (2007) al evaluar alimentos integrales para ovinos en engorda, obtuvo GP entre 3.0 a 4.25 kg por periodo de 15 días, ambas investigaciones muestran un comportamiento similar con el obtenido en el presente estudio. Galina et al. (2008), al alimentar borregos con una dieta balanceada en la que incluyó ensilado de maíz obtuvieron GP de 2.02 a 4.08 kg. Castro-Pérez et al. (2014), al sustituir diferentes porcentajes grano de maíz rolando y pasta de soya, por grano de destilería seco, obtuvieron GP de 3.6 a 4.05 kg, y Álvarez-Morales et al. (2003) ofrecieron a borregos una dieta 70 % concentrado 30 % semilla de parota (*Enterolobium cyclocarpum*) obteniendo una GP de 1.29, observando una GP menores a los obtenidos en la presente

investigación a pesar de alimentar a los animales con ensilados de nopal – tuna – grano de jamaica provenientes de subproductos agrícolas.

**Cuadro 3.** Medias de los factores independientes analizados para las dietas de los parámetros de producción animal de ovinos alimentados con ensilado de nopal - tuna - grano de jamaica.

Dieta	Peso final	GP	GDP	CMS	CA
	kg	kg	g d <sup>-1</sup>	kg alimento	
DSE	39.61 <sup>a</sup>	3.80 <sup>a</sup>	0.253 <sup>a</sup>	20.03 <sup>a</sup>	5.40 <sup>a</sup>
DEM	37.35 <sup>b</sup>	4.36 <sup>a</sup>	0.291 <sup>a</sup>	17.97 <sup>b</sup>	4.18 <sup>b</sup>
DEN10	37.04 <sup>bc</sup>	4.36 <sup>a</sup>	0.291 <sup>a</sup>	17.38 <sup>c</sup>	4.21 <sup>b</sup>
DEN20	35.80 <sup>c</sup>	4.38 <sup>a</sup>	0.291 <sup>a</sup>	16.94 <sup>c</sup>	4.30 <sup>b</sup>
DMS 0.05	1.44	0.77	0.05	0.57	0.73

Peso final, peso promedio final de los animales; GP, ganancia de peso promedio por periodo de 15 días; GDP, ganancia diaria de peso; CMS, consumo de materia seca por periodo de 15 días; CA, conversión alimenticia. <sup>abc</sup> medias en la misma columna con diferente literal son diferentes.

Velásquez-Vélez et al. (2022) reportan CA de 4.73 a 4.67 al realizar una engorda de borregos Pelibuey incluyendo 25 y 50 % de ensilado de pulpa de naranja, mientras que Lazalde-Cruz (2021) reporta valores de CA de 4.43 a 5.02 en dietas con diferentes concentraciones de propionato de calcio y grano de jamaica, ambos casos teniendo resultados similares a los obtenidos en la presente investigación. Por otra parte, Reséndiz-Hernández et al. (2012) reporta valores de CA de 5.05 a 6.26 para borregos suplementados con *Saccharomyces cerevisiae* y selenio y cromo orgánicos, mientras que Mora-Jaimes et al. (2002) reportan valores de CA entre 5.50 y 5.70 para borregos engordados una dieta convencional adicionada con grano de sorgo tratado con amilasas, Álvarez-Morales et al. (2003) reporta CA de 7.47 a 10.35 para ovinos alimentados con diferentes cantidades de frito de parota y pollinaza, estos tres últimos casos reportan peores CA que los encontrados en este estudio. La buena CA de los tratamientos ensilados, puede atribuirse a la mejor disponibilidad de los nutrientes, De Azevedo et al. (2021), Kazemi-Bonchenari et al. (2022) y Sileshi et

al. (2021) mencionan que los adecuados niveles de energía metabolizable y proteína contenido en la dieta, tienen efecto en la respuesta productiva animal, así como en la eficiencia de utilización de los nutrientes por los microorganismos ruminales.

El período afecto todas las variables ( $P=0.0001$ ). Se observó consistentemente que el peso, GP, DGP y CMS fue mayor y la CA menor en el período de 46 a 60 d en comparación a los otros dos períodos, lo que indicó que se mejoraron las variables productivas en el último período de engorda (Cuadro 94). Esto se debe a la alimentación y crecimiento que tienen los animales a través del tiempo (Mendez-Llorent et al., 2011).

La GDP fue similar a los reportados por Magaña-Monforte et al. (2015) para borregos Katahdin, Katahdin x Pelibuey y Katahdin x Dorper, (0.353, 0.229 y 0.346 kg). Martínez-Hernández (2020), alimentando animales con dietas con diferentes niveles de energía y proteína, encontró CMS a los 30 días de 17.175 kg de alimento, siendo similares a los encontrados en el presente estudio, sin embargo, para el periodo de 45 d se encuentra una diferencia de CMS de 4.945 y de 2.875 kg de alimento para los 60 d.

**Cuadro 9.** Medias de los factores independientes analizados a través del tiempo para los parámetros productivos de ovinos alimentados con ensilado compuesto de nopal - tuna - grano de jamaica.

Tiempo	Peso Periodo	GP	GDP	CMS	CA
	kg	kg	g d <sup>-1</sup>	kg alimento	
30	33.30 <sup>c</sup>	3.80 <sup>b</sup>	0.237 <sup>b</sup>	17.32 <sup>b</sup>	5.01 <sup>a</sup>
45	36.87 <sup>b</sup>	3.56 <sup>b</sup>	0.254 <sup>b</sup>	17.53 <sup>b</sup>	4.95 <sup>a</sup>
60	42.17 <sup>a</sup>	5.30 <sup>a</sup>	0.353 <sup>a</sup>	19.40 <sup>a</sup>	3.62 <sup>b</sup>

Peso periodo, peso promedio de los animales al finalizar el periodo de tiempo; GP, ganancia de peso promedio por periodo de 15 días; GDP, ganancia diaria de peso; CMS, consumo de materia seca por periodo de 15 días; CA, conversión alimenticia. <sup>abc</sup>medias en la misma columna con diferente literal son diferentes.

Raymundo-Hernández (2017) al sustituir heno de alfalfa con diferentes niveles de ensilado de maíz (0 a 30 %) encontró CA entre 5.6 y 6.6 unidades, Hafez et al. (2012) observaron que el ensilaje de maíz con inóculo microbiano aumentó la proteína cruda y el extracto etéreo, además, disminuyó la fibra cruda, fibra detergente neutro y fibra detergente ácido, encontraron que al alimentar con diferentes niveles de ensilado de maíz inoculado (0 a 70 %) se obtienen CA de 4.6 a 6.3 unidades.

## 6.5. CONCLUSIONES

La inclusión de ensilado compuesto de nopal – tuna – grano de jamaica, en una dieta integral, no muestra desventajas en el comportamiento productivo de borregos en engorda, haciendo de éste un ingrediente que puede ser utilizado para la alimentación de borregos, tomando en cuenta algunas consideraciones para el uso de ensilaje de nopal como son: 1) cuando se incrementa el precio de los granos; 2) cuando existe escasez de forraje; 3) cuando exista ventajas económicas al sustituir el forraje para incorporar ensilado de nopal.

## 6.6. LITERATURA CITADA

- Aguirre, L., Cevallos, Y., Herrera, R., & Escudero, G. (2016). Utilización de ensilaje de maíz y alfalfa en la alimentación de ovinos mestizos en pastoreo. *Revista de La Dirección de Investigación*, 6, 76–82.
- Álvarez-Morales, G., Melgarejo-Velásquez, L., & Castañeda-Nieto, Y. (2003). Weight gain, feed conversion and efficiency in sheep fed with parota tree (*Enterolobium cyclocarpum*) fruit (seed and pod) and poultry manure. *Veterinaria México*, 34(1), 39–46.
- Aranda Aranda O., G., Flores V. C. A., & Cruz, M. F. M. (2008). Inclusion of cactus pear cladodes in diets for finishing lambs in Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 12: pp 49 – 55.
- Bobadilla-Soto, E. E., Ochoa-Ambriz, F., & Perea-Peña, M. (2021). Dinámica de la producción y consumo de carne ovina en México 1970 a 2019. *Agronomía Mesoamericana*, 963–982. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44473>
- Castro-Pérez, B. I., Estrada-Angulo, A., Ríos, F. G., Dávila-Ramos, H., Robles-Estrada, J. C., Contreras-Pérez, G., Calderón-Cortés, J. F., López-Soto, M. A., Barreras, A., & Plascencia, A. (2014). Effects of replacing partially dry-rolled corn and soybean meal with different levels of dried distillers' grains with solubles on growth performance, dietary energetics, and

- carcass characteristics in hairy lambs fed a finishing diet. *Small Ruminant Research*, 119(1–3), 8–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.03.007>
- Costa, G. R., Filho, E. M. B., Medeiros, A. N., Givisiez, P. E. N., Egypto-Queiroga, R. C. R., & Melo, A. A. S. (2009). Effect of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Research*, 82, 62–65.
- de Azevedo, E. B., Savian, J. V., do Amaral, G. A., de David, D. B., Gere, J. I., Kohmann, M. M., Bremm, C., Jochims, F., Zubieta, A. S., Gonda, H. L., Bayer, C., & de Faccio Carvalho, P. C. (2021). Feed intake, methane yield, and efficiency of utilization of energy and nitrogen by sheep fed tropical grasses. *Tropical Animal Health and Production*, 53(5), 452.  
<https://doi.org/10.1007/s11250-021-02928-4>
- De la Rosa- Zariñana, A. E., Miranda-Romero, L. A., Martínez-Hernández, P. A., Vargas-Villamil, L. M., & Elmasry, A. (2023). Nivel de proteína y energía en la fermentación in vitro de dietas para borregos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3545>
- Díaz-Ayala, F., Álvarez-García, G. del S., & Sima-Moo, E. (2015). Drying kinetics of slices of nopal (*Opuntia ficus indica*) cladodes in a convective transversal flow dryer. *Agrociencia*, 49, 845–857.
- El Hag, M. G., Al-Merza, M. A., & Al Salti, B. (2002). Growth in the Sultanate of Oman of small ruminants given date byproducts-urea multinutrient blocks. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(5), 671–674.  
<https://doi.org/10.5713/ajas.2002.671>
- Galina, M. A., Ortiz-Rubio, M. A., Guerrero, M., Mondragón, D. F., Franco, N. J., & Elías, A. (2008). Efecto de un ensilado de maíz solo o inoculado con un probiótico láctico y adicionado con un suplemento nitrogenado de lento consumo en ovinos. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 12(2), 23–34.
- Hafez, Y. H., Abedo, A. A., & Khalifa, E. I. (2012). Effect of microbial inoculation of whole plant corn silage on growth performance and carcass characteristics of rahmani lambs. *Egyptian Journal of Sheep and Goat Sciences*, 7(2), 17–29.
- Herrera-Haro, J. G., Alvarez, G., Bárcena-Gama, R., & Núñez-Aramburu, J. M. (2019). Caracterización de los rebaños ovinos en el sur de Ciudad de México, México. *Acta Universitaria*, 29, 1–15.  
<https://doi.org/10.15174/au.2019.2022>
- Jínez, T., Cortés, A., Ávila, E., Casaubon, M. T., & Salcedo, R. (1998). Efecto de niveles elevados de semilla de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) en dietas para pollos sobre el comportamiento productivo y funcionamiento hepático. *Veterinaria México*, 29, 7. <http://www.medigraphic.com/pdfs/vetmex/vm-1998/vm981f.pdf>

- Kazemi-Bonchenari, M., Khanaki, H., Jafari, A., Eghbali, M., Poorhamdollah, M., & Ghaffari, M. H. (2022). Milk feeding level and starter protein content: Effects on growth performance, blood metabolites, and urinary purine derivatives of Holstein dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 105(2), 1115–1130. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21208>
- Lazalde-Cruz, R. (2021). Calidad química-fermentativa del esquilmo y grano de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) para la engorda de ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Estado de México. P 113.
- López, Y., Arece, J., León, E., Aróstica, N., & Ojeda, F. (2008). Efecto de la inclusión de un ensilaje mixto en el comportamiento productivos de ovejas Pelibuey en pastoreo. *Pastos y Forrajes*, 21(1), 73–82.
- Magaña-Monforte, J. G., Moo-Catzin, C. J., Chay-Canul, A. J., Aké-López, J. R., Segura-Correa, J. C., & Montés-Pérez, R. C. (2015). Crecimiento y componentes de la canal de ovinos de pelo en jaulas elevadas. *Livestock Research for Rural Development*, 27(6), 2015.
- Malisetty, V., Yerradoddi, R., Mallam, N., Cherala, H., Admal, R., & Manthani, G. (2013). Effect of feeding maize silage supplemented with concentrate and legume hay on growth in Nellore ram lambs. *Veterinary World*, 6(4), 209. <https://doi.org/10.5455/vetworld.2013.209-213>
- Martínez-Dávila, J., Morales, M., Velasco, J., & Torres-Hernández, G. (2004). Evaluación del potencial para la producción ovina con enfoque de agroecosistemas en un ejido de Veracruz, México. *Técnica Pecuaria En México*, 42(3), 347–359.
- Martínez-Hernández, B. E. (2020). Indicadores de calentamiento global, selectividad y aprovechamiento de la dieta mediante la producción de gas. Tesis Maestría, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.
- Mejía-Haro, J., Delgado-Hernández, J. L., Mejía Haro, I., Guajardo-Hernández, I., & Valencia-Posadas, M. (2011). Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21, 11–16.
- Mendez-Llorent, F., Ramírez-Lozano, R. G., López-Carlos, M. A., Rodríguez-Frausto, H., Arechiga-Flores, C. F., Bonilla-Salazar, A., Núñez-González, M. A., & Aguilera-Soto, J. I. (2011). Performance and nutrient digestion of lambs fed incremental levels of wild cactus (*Opuntia leucotrichia*). *Journal of Applied Animal Research*, 39(3), 248–251.
- Mendoza-Martínez, German D., Pinos-Rodríguez, J. M., Lee-Rangel, H. A., Hernández-García, P. A., Rojo-Rubio, R., & Relling, A. (2016). Effects of dietary calcium propionate on growth performance and carcass characteristics of finishing lambs. *Animal Production Science*, 56(7), 1194. <https://doi.org/10.1071/AN14824>

- Mendoza-Martínez, Germán David, Plata-Pérez, F. X., Ramírez-Mella, M., Mejía-Delgadillo, M. A., Lee-Rangel, H., & Bárcena-Gama, R. (2007). Evaluación de alimentos integrales para el engorde intensivo de ovinos. *Revista Científica Maracaibo*, 17(1), 66–72.
- Miranda-Romero, L. A., Vázquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., & Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 196–215.
- Mora-Jaimes, G., Bárcena-Gama, R., Mendoza-Martínez, G. D., González-Muñoz, S., & Herrera-Haro, J. G. (2002). Respuesta productiva y fermentación ruminal en borregos alimentados con grano de sorgo tratado con amilasas. *Agrociencia*, 36, 31–39.
- Muciño-Castillo, G., Miranda-Romero, L. A., González-Muñoz, S., Bárcena-Gama, R., & Crosby-Galván, M. M. (2014). Efecto de la inclusión de harina de nopal en dietas en la fermentación in vitro y la engorda de corderos. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Mukhtar, A. M. (2007). The effect of feeding rosella (*Hibiscus Sabdariffa*) seed on broiler chick's performance. *Research Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2, 21–23.
- Núñez Torres, O. P., Rodríguez, M.-B., Sanchez, D., & Guishca-Cunuhay, C. (2018). Comportamiento productivo, degradación ruminal y producción de gas in vitro en ovinos alimentados con dietas a base de residuos postcosecha de *Chenopodium quinoa*. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 29(3), 765–773. <https://doi.org/10.15381/rivep.v29i3.14836>
- Ortiz-Heredia, M., Miranda-Romero, L., Lara-Bueno, A., Martínez-Hernández, P., Sánchez del Real, C., & Aranda-Osorio, G. (2013). Comportamiento productivo de corderos con dietas de harina de nopal y ensilado nopal-tuna. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 81–84.
- Pereira, M. S., Ribeiro, E. L. de A., Mizubuti, I. Y., Rocha, M. A. da, Kuraoka, J. T., & Nakaghi, E. Y. O. (2008). Consumo de nutrientes e desempenho de cordeiros em confinamento alimentados com dietas com polpa cítrica úmida prensada em substituição à silagem de milho. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37(1), 134–139. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000100020>
- Raymundo-Hernández, C. (2017). Efecto de nivel de ensilaje de maíz en sustitución de heno de alfalfa en dietas de finalización para ovinos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México.

- Reséndiz-Hernández, M., Bárcena-Gama, J. R., Crosby-Galván, M. M., Cobos-Peralta, M., Herrera-Haro, J. G., Hernández-García, P. A., & Carreón-Luna, L. (2012). Efecto del selenio y cromo orgánicos y (*Saccharomyces cerevisiae*) en la degradación In situ de la dieta, fermentación ruminal y crecimiento de borregos. *Agrociencia*, 47, 745–755.
- Rodríguez-García, M. E., de Lira, C., Hernández-Becerra, E., Cornejo-Villegas, M. A., Palacios-Fonseca, A. J., Rojas-Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L. C., Del-Real, A., Zepeda, T. A., & Muñoz-Torres, C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), 107–112. <https://doi.org/10.1007/s11130-007-0049-5>.
- Static Analisis Sistem, S. (2013). *Static Analisis Sistem* (No. 2004).
- Sagarnaga-Villegas, L., Salas-González, J., Mendoza A., Kú, V., Delgado, J., Díaz, F., Trujillo, J., Díaz, T., Martínez, R., Gutiérrez, N., Lozano, E., López, J., Robles, L., González, R., Cigales, M., Barrera, G., Miranda, M., Magaña, J., González, J., Montoya, G., León, N., García, L., & Covarrubias, I. (2010). Unidades representativas de producción agrícola. Panorama Económico 2008-2018. Reporte.
- SIAP. (2023). Avance de Siembras y Cosechas Resumen nacional por estado. [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do)
- Sileshi, G., Mitiku, E., Mengistu, U., Adugna, T., & Fekede, F. (2021). Effects of dietary energy and protein levels on nutrient intake, digestibility, and body weight change in Hararghe highland and Afar sheep breeds of Ethiopia. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 8(2), 185. <https://doi.org/10.5455/javar.2021.h501>
- Van de Vyver, W., Beukes, J., & Meeske, R. (2014). Maize silage as a finisher feed for Merino lambs. *South African Journal of Animal Science*, 43(5), 116. <https://doi.org/10.4314/sajas.v43i5.21>
- Vázquez-Mendoza, P. (2016). Aprovechamiento del Nopal y Tuna en la Alimentación de Ovinos. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, pp 109.
- Velásquez-Vélez, R., Esquivel-Mimenza, H., Montero-Canul, L., & Kun-Vera, J. (2022). Engorda de corderos Pelibuey con ensilaje de pulpa de naranja *Citrus sinensis* L. en jaulas elevadas. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 5, 67–71. <https://revistas.ut.edu.co/index.php/ciencianimal/article/view/127>
- Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431.