



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

**“EFECTO DEL USO DE ADITIVOS EN EL VALOR NUTRICIONAL *IN VITRO* DE ENSILADOS DE NOPAL FORRAJERO (*OPUNTIA SPP*)”**

**TESIS**

Que para obtener el título de:  
**Médico Veterinario Zootecnista**

**PRESENTA:**

**Michel Porcayo Cabrera**

**ASESORES:**

Dra. Aurora Sainz Ramírez

Dr. Carlos Manuel Arriaga Jordán

MVZ. Alejandro Adelaido Morales Cruz

**REVISORES**

Dr. Ernesto Morales Almaraz

Dr. Juan Edrei Sánchez Torres



Toluca de Lerdo, México, octubre de 2024

## RESUMEN

Debido al cambio climático se vuelve cada vez más indispensable la exploración de alternativas de alimentación para lograr una eficiencia productiva de los sistemas de producción de leche a pequeña escala (SPLPE). El nopal forrajero, ha sido utilizado como un forraje de emergencia en tiempos de sequías y actualmente se estudia como un ingrediente más en las dietas de rumiantes debido principalmente al aporte de agua, así como la alta disponibilidad de carbohidratos solubles y minerales. Al presente, se ha considerado su conservación a través del ensilado.

A través de la fermentación de carbohidratos solubles, el proceso de ensilaje se ha convertido en un método de conservación bastante efectivo gracias a la baja repercusión negativa en la calidad nutricional de los alimentos.

En el presente trabajo se evaluó la composición química de ensilado de nopal adicionado con 20% de rastrojo de maíz con mazorca molido y 10% de melaza suplementado con distintos aditivos. Se utilizaron pencas de nopal forrajero sembrado en 2021 en Yuridia, Guanajuato. Los microsilos se elaboraron en el laboratorio del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, se realizaron cuatro tratamientos distintos, contando el tratamiento control, utilizando como aditivos un inóculo bacteriano, urea e inóculo con urea que fueron añadidos al momento de la elaboración.

Los microsilos se abrieron 30 días después de su elaboración y posteriormente se realizaron estudios de laboratorio para obtener su composición química: materia seca (MS), materia orgánica (MO), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), proteína cruda (PC) y digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS). Asimismo, se evaluó la presencia de hongos, el tamaño de dichas colonias, temperatura y el pH del ensilado. Las diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos más importantes fueron en contenido de proteína cruda, materia orgánica, en digestibilidad *in vitro* de la materia seca y pH coincidiendo el incremento de todas las variables en el tratamiento adicionado con urea concluyéndose así que dicho tratamiento es la opción más viable como alternativa forrajera de la alimentación en rumiantes.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	7
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	9
1. Cambio climático.....	9
3. Sistemas de producción de leche en pequeña escala.....	11
4. Alternativas forrajeras .....	12
5. Nopal forrajero.....	13
6. Ensilaje.....	15
6.1 Proceso de ensilaje .....	15
6.2 Fermentación .....	17
6.3 Uso de aditivos .....	17
JUSTIFICACIÓN .....	19
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	20
HIPÓTESIS.....	20
OBJETIVOS .....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos .....	20
MATERIAL Y MÉTODOS .....	21
MATERIAL BIOLÓGICO .....	21
MÉTODO .....	21
Tratamientos .....	21
Análisis químico .....	22
LÍMITE DE ESPACIO .....	24
LÍMITE DE TIEMPO.....	25
RESULTADOS .....	26
DISCUSIÓN.....	29
CONCLUSIÓN.....	32
REFERENCIAS .....	33

## INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia spp*) es una planta propia del paisaje mexicano y que junto con el maíz (*Zea mays*), el frijol (*Phaseolus vulgaris*) y el maguey (*Agave americano*) ha sido parte importante de la alimentación y el asentamiento de las poblaciones, así como del desarrollo de grandes culturas mexicanas. También destaca su utilización para la elaboración de bebidas, medicina, tintes y prácticas mágico-religiosas (Anaya-Pérez y Bautista-Zane, 2008).

Se trata de un recurso cuya relevancia ha sido mayor en las zonas semidesérticas y desérticas del país donde los cambios de temperatura llegan a ser extremos y como consecuencia presentan largos periodos de sequía con una importante escasez de forraje por lo que los productores se ven obligados a buscar alternativas de alimentación para sus animales (Martínez-López *et al.*, 2009). No obstante, se trata de una planta nativa del altiplano central de México (Medina-García *et al.*, 2021) por lo que es posible encontrarla en prácticamente, cualquier zona del país.

El nopal forrajero se ha presentado como una alternativa de alimentación para el ganado útil no solo por su resistencia a las sequias, sino también por su adaptabilidad a diferentes ambientes, mayor que muchas gramíneas o plantas forrajeras de hoja ancha.

El nopal forrajero es una fuente que aporta energía, agua, minerales y vitaminas; pero debe combinarse con otros ingredientes para poder completar la dieta del ganado debido a que su contenido de proteína es bajo a pesar de ser rico en carbohidratos y calcio (Díaz-Plascencia *et al.*, 2012).

Una característica de los rumiantes es su simbiosis con la microbiota ruminal, que utilizan fuentes de nitrógeno no proteico para la síntesis de su propia proteína microbiana, que finalmente pasa al resto del tracto digestivo del rumiante hospedador que la utiliza como fuente de proteína de calidad (CSIRO, 2007).

Su principal uso ha sido como forraje de emergencia; sin embargo, se estudia como ingrediente en la alimentación de ganado bovino y ovino (Basurto *et al.*, 2014), y se ha considerado en gran medida su conservación a través del proceso de ensilado.

El ensilaje, a través de la fermentación natural de carbohidratos solubles de los forrajes producida a partir de bacterias anaeróbicas productoras de ácido láctico, permite conservar dichos forrajes gracias a la acidificación producida sin repercutir negativamente en la calidad nutricional de estos (Garcés-Molina *et al.*, 2004). El nopal forrajero tiene también un bajo contenido de materia seca, y cuando los forrajes poseen un bajo nivel de materia seca y/o bajo nivel de carbohidratos solubles necesitan ser acompañados de aditivos para mejorar las condiciones del proceso de fermentación (Paulo, 2001).

Por otro lado, los posibles efectos del cambio climático en el centro de México se manifiestan como un cambio en el régimen de lluvias, con menores precipitaciones o periodos secos más prolongados (Zamora-Martínez, 2015). Lo anterior hace necesario estudiar alternativas forrajeras mejor adaptadas a esos efectos del cambio climático (Thornton *et al.*, 2009); donde el nopal forrajero es una opción importante dada su resistencia al déficit hídrico; y su conservación mediante ensilaje representa la posibilidad de contar con forraje para la época de escasez en los sistemas de producción ganadera.

Este trabajo propone evaluar mediante micro-silos de laboratorio el efecto de la adición de un inoculante bacteriano como fuente de bacterias homofermentativas para acelerar y asegurar una fermentación adecuada durante el proceso de ensilaje, o una solución de urea como fuente de nitrógeno no proteico para incrementar el nivel de proteína cruda en el ensilaje, o bien la inclusión de ambos aditivos, en el valor nutricional *in vitro* de ensilados de nopal forrajero.

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 1. Cambio climático

De acuerdo con el Artículo 1 de La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se define “cambio climático” como una variabilidad en el clima que puede atribuirse de manera directa o indirecta a la actividad humana alterando la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural.

Durante los últimos 50 años, México ha presentado eventos extremos tanto en temperaturas como en precipitaciones y los efectos del cambio climático se han vuelto tangibles a nivel nacional. Las temperaturas han aumentado, en promedio, un aproximado de 0.85°C por arriba de la climatología normal y desde principios de la década de los 2000, se han incrementado los días secos consecutivos hasta alcanzar un promedio cercano a 70 días por año. En cuanto a precipitación, esta ha mostrado tendencias negativas principalmente en invierno y en el noroeste y suroeste del país alcanzando valores de hasta -2mm/día por siglo (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023; SINACC, 2021; SAGARPA, 2012)

SAGARPA (2012) estableció que más de la mitad del territorio mexicano cambiará sus condiciones de temperatura y precipitación, de tal modo que el clima podría ser clasificado dentro de otro subtipo y los habitantes de los ecosistemas deberán adaptarse a estas nuevas condiciones.

De acuerdo a la revisión de literatura realizada por Estrada-Porrúa *et al.* (2023), la mayoría (39.8%) de las investigaciones relacionadas al impacto climático en el sector agrícola, van enfocadas en estimar impactos futuros; y solo el 16.7% de las publicaciones restantes se enfocan en el análisis de la relación entre aspectos fenológicos de los cultivos y las variables climáticas como son la duración de temporadas secas o de lluvias.

Como consecuencia del cambio climático, el mayor reto de los sistemas agroalimentarios será asegurar el suministro de alimentos suficiente frente a la fuerte demanda que trae consigo el acelerado crecimiento demográfico, el

incremento en la esperanza de vida y los cambios en el patrón de consumo (SAGARPA, 2012). Durante los próximos años será necesario que los productores ganaderos incorporen cambios tecnológicos que permitan producir más con menos insumos (Basurto-Hernández et al., 2023).

## **2. Sistemas de producción de leche en México**

A nivel mundial, la producción de leche bovina se encuentra entre las actividades pecuarias más sobresaliente debido a la alta demanda para el consumo de la población, especialmente de niños y adultos mayores. En México, la producción de leche y carne bovina, representa el 32% del producto interno bruto (PIB) en el ámbito alimentario (Avilés-Ruíz et al., 2024)..

Según FIRA (2021), para 2020 se produjeron 12,563 millones de litros de leche representando un 2.0% del volumen mundial y ubicando a México como el octavo productor de leche a nivel mundial considerando a la Unión Europea como un solo ente, y se estimó que para el año 2021 hubiese un incremento del 2.2%. Sin embargo, de acuerdo con la SIAP (2023) para el año 2022 se produjeron 13,105 millones de litros de leche, representando un 2.0% de crecimiento.

La producción de leche, a lo largo del territorio nacional, presenta diferentes características propias de cada región de acuerdo con factores climatológicos, agroecológicos, su importancia productiva, factores tecnológicos y finalmente su impacto socioeconómico. En México, se identifican tres sistemas de producción: Sistema de producción de leche intensivo especializado de mediana y gran escala (SIE), sistema de producción de leche en pequeña escala (SPLPE) y el sistema de producción doble propósito (SDP) (Avilés-Ruíz *et al.*, 2024; Hernández-Morales *et al.*, 2013).

Los SIE se encuentran principalmente en la región centro norte y norte del país, destacando La Comarca Lagunera (Torreón, Matamoros, San Pedro, Francisco I. Madero, etc.), Chihuahua y otros estados como Aguascalientes, Guanajuato, y Querétaro; los SPLPE se encuentran en todo el país pero se concentran en Altiplano Central mexicano que van desde Zacatecas, pasando por Aguascalientes, Jalisco,

Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México y Puebla; y finalmente los SDP que se encuentran en las regiones tropicales de México (p.ej. el Sur del Estado de México) (Avilés-Ruíz et al., 2024).

### **3. Sistemas de producción de leche en pequeña escala**

Los SPLPE tienen una gran importancia a nivel nacional, ya que en el 2007 representaron alrededor del 78% de las granjas lecheras que contribuían con más del 35% de la producción de leche en México; y que, a pesar del tiempo, se han mantenido constantes y generando ingresos. Se caracterizan por poseer entre 3 a 35 vacas más las de reemplazo y la mano de obra familiar demostrando ser una opción para combatir la pobreza rural (Sánchez-valdés *et al.*, 2023; Velarde-Guillen *et al.*, 2019) .

Además, dada su gran demanda de mano de obra, también les permite a las familias permanecer en sus comunidades sin necesidad de emigrar a las ciudades en busca de empleo. Análisis económicos, han demostrado que la producción lechera a pequeña escala tiene mayores márgenes por hectárea que el cultivo de maíz y genera rendimientos rentables (Arriaga-Jordán et al., 2002).

Una de las principales estrategias de alimentación es el pastoreo, reduciendo en gran medida los costos de producción pero al llegar la época de sequía, se obliga a los productores a adquirir concentrados comerciales que representan un mayor gasto y puesto que la alimentación representa aproximadamente el 62% de los costos de producción, se debe considerar la reducción de estos (Álvarez-García et al., 2022).

Pese a la gran importancia de estos sistemas, su eficiencia productiva se ve gravemente afectada por la estacionalidad en el suministro de alimentos, pues una vez que llega la época seca, la disponibilidad de forrajes disminuye considerablemente (Carrillo-Hernández et al., 2023), situación que se agrava por los periodos secos prolongados y la distribución errática de las lluvias como efectos del cambio climático. Es por esto que surge la necesidad de evaluar estrategias de alimentación que estén enfocadas en el uso de forrajes que requieran menor

cantidad de agua y se adapten a diferentes condiciones ambientales (Álvarez-García et al., 2022).

#### **4. Alternativas forrajeras**

Se estima que para 2050, la población mundial se encuentre rebasando los 9,000 millones de personas, dicho crecimiento demográfico traerá consigo una situación difícil en cuando a la producción de alimentos. Es por ello que en los próximos años será necesaria la aplicación de todo el conocimiento referente a la nutrición y alimentación del ganado para lograr un uso eficiente de los recursos alimentarios para que este se vea reflejado, a su vez, en la eficiencia productiva de los animales (Ramírez-Ramírez, 2016).

La nutrición es uno de los aspectos más importantes para la producción animal de cualquiera de las especies utilizadas para el consumo humano (Cano-Cardozo y Valencia-Trujillo, 2018). Debido al estrés calórico y a la cada vez más escasa disponibilidad de agua ocasionada por el cambio climático (Sánchez-Duarte *et al.*, 2018) las frecuentes sequías y la consecuente escasez de forrajes limitan la alimentación y producción de ganado (Villa-Herrera *et al.*, 2009).

Los forrajes son el principal ingrediente que compone la dieta del ganado lechero puesto que son la principal fuente de fibra efectiva que además de contribuir en el consumo de materia seca, mantiene el normal funcionamiento del rumen. Los principales forraje utilizados en México son los ensilados de maíz y sorgo, henos o ensilados de alfalfa y cereales de grano pequeño, de forma que la inclusión de este ingrediente a la dieta puede variar entre el 40-80% en base húmeda (Sánchez-Duarte *et al.*, 2018).

La producción de forrajes suele ser limitada debido a la baja disponibilidad de agua, las condiciones del suelo, alta temperatura ambiental y el número limitado de cultivos forrajeros (Reta-Sánchez *et al.*, 2015). Por otro lado, el tipo de alimentación del ganado, cualquiera que sea el tipo de explotación, va a repercutir en la calidad y composición nutricional de la leche y carne. Se ha reportado un incremento importante en el contenido de ácidos grasos favorables para la salud de los

consumidores en la leche que es producida con dietas altas en forraje (Sánchez-Duarte *et al.*, 2018).

A medida que la escasez de agua aumenta en las zonas áridas, semiáridas y templadas de México, se vuelve indispensable estudiar el cultivo de forrajes alternativos cuya demanda de agua para su producción sea reducida (López-Jara *et al.*, 2022). En el caso de los climas subhúmedos, el principal problema es la producción irregular del forraje debido a la marcada estacionalidad de la precipitación y como consecuencia de las largas temporadas secas, los pastos tienen índices bajos de producción así como de su calidad, provocando una baja productividad del ganado (Villa-Herrera *et al.*, 2009).

Por lo tanto, la investigación y estudio de posibles cultivos forrajeros para la alimentación de las explotaciones pecuarias, se ha vuelto indispensable para permitir una producción eficiente y sostenible. En este sentido, se han realizado estudios con especies forrajeras comunes y de producción de forraje que sirven como dieta alternativa total o parcial (Cano-Cardozo y Valencia-Trujillo, 2018).

Se han evaluado distintos cultivos forrajeros, desde leguminosas y oleaginosas, así como el aprovechamiento de hoja, raíz y tallos fibrosos de los pastos tropicales (López-Jara *et al.*, 2022). Aunque se ha demostrado la viabilidad de distintos cultivos cuya demanda de agua es menor y presentan una mejor adaptación al cambio climático, es necesario que se pueda ampliar su investigación agronómica para el estudio de su preservación, conservación y uso futuro. Las investigaciones sobre la elaboración de los distintos ensilados probando las distintas densidades de compactación, el porcentaje de materia seca al momento de la cosecha y el efecto que tiene la aplicación de aditivos o inoculantes bacterianos sobre el proceso de fermentación y de la calidad nutricional; deben seguir ampliándose y realizarse de la manera más pronta posible (Sánchez-Duarte *et al.*, 2018).

## **5. Nopal forrajero**

De acuerdo con la norma mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006, se define como nopal a los cladodios jóvenes (brotes tiernos) de la planta perteneciente a la familia de las cactáceas, de los géneros *Opuntia spp.* Los cladodios son el segmento de un tallo

de forma aplanada, provisto de gloquidias (ahuates) y espinas en puntos específicos denominadas areolas.

Se ha estimado que son únicamente 15 las especies utilizadas como forraje y a nivel internacional el mayor productor es Brasil, seguido de Sudáfrica, México y Túnez (Flores-Hernández et al., 2019). “La importancia forrajera del nopal *Opuntia spp* aplica para el ganado aún durante los períodos de sequía en el verano o el invierno, el nopal permanece verde” (Díaz et al., 2012).

En cuanto a su composición química, el nopal suele ser muy variable en función de la especie, la edad de los cladodios (llamados raquetas) (Torres-Sales, 2011), las condiciones ambientales, la temporada de cosecha y el tratamiento posterior (Aparicio-Ortuño y Ortega-Regules, 2018). Sin embargo, aún no existen estudios suficientes acerca del aprovechamiento real de los nutrientes que componen esta planta (Díaz-Plascencia et al., 2012). La gran riqueza del nopal se encuentra en su contenido de carbohidratos solubles y minerales principalmente calcio y potasio (Torres-Sales, 2011). Dentro de los carbohidratos que componen dicha planta, el 50% corresponde al mucilago que no es más que el líquido viscoso secretado por los nopales y cuya función es la regulación del contenido de agua celular durante periodos largos de sequía y así poder regular la cantidad de calcio en la planta (Aparicio-Ortuño y Ortega-Regules, 2018). Asimismo, presenta altos niveles de agua en su composición lo cual a su vez atiende los requerimientos de agua del ganado alimentado con nopal, reduciendo así la necesidad de agua de bebida (Urrutia-Morales et al., 2014).

Sin embargo, no es posible ofrecerse con un alimento único. Según lo reportado por Torres-Sales (2011) donde se comparó la composición nutricional de distintas especies de nopal con ensilados de sorgo y maíz. Se determinó que, a pesar de que el nopal presenta niveles menores de materia seca, fibra detergente neutra (FDN) y fibra ácido detergente (FDA), en cuanto a niveles a fósforo y potasio es en promedio, unas cinco veces más alto que el del sorgo y el maíz; los valores para el contenido de carbohidratos solubles, aunque en el ensilado de maíz son de excelente calidad, el nopal reporta valores por arriba del doble que los del maíz,

finalmente, cuando se compara la digestibilidad *in vitro* se observan porcentajes mayores en el nopal, llegando incluso a un 60%.

Una opción para integrar dietas a base de nopal para la producción de ensilaje de alimento total es el uso de coproductos con una alta cantidad de fibra detergente neutro (Kubitschek-Bervenuto da Silva *et al.*, 2022).

## **6. Ensilaje**

Comúnmente, los forrajes son consumidos en forma fresca, sin embargo, existen técnicas de conservación que permiten que los forrajes puedan utilizarse en periodos de escasez ya sea por medio del secado (henificación) o mediante un proceso de fermentación (ensilado). Cada método tiene su grado de dificultad y requiere de ciertos factores para que pueda llevarse a cabo de la manera correcta (Stefanie *et al.*, 2001)

El ensilado, es un proceso de conservación de forrajes húmedos a partir de la acidificación producida por bacterias epifíticas de ácido láctico (BAL) que fermentan los carbohidratos solubles del forraje produciendo ácido láctico y, en menor medida, ácido acético, lo que provoca una baja del pH del material ensilado inhibiendo así la presencia de los microorganismos indeseables, resultando en un forraje con mínimas pérdidas nutricionales y manteniéndose palatable para el ganado (Garcés-Molina *et al.*, 2004).

La calidad nutricional de un ensilado depende del valor nutricional del forraje utilizado, del manejo realizado al momento de su elaboración y finalmente del manejo a la apertura y uso.

### **6.1 Proceso de ensilaje**

Para lograr un proceso adecuado del ensilaje debemos tener en cuenta factores como el momento del corte del forraje, evitar su contaminación al ser cosechado y sellarlo lo más pronto posible para evitar la entrada de aire. De acuerdo con Stefanie *et al.* (2001) y Garcés-Molina *et al.* (2004), una vez que este proceso se ha llevado a cabo de la manera correcta, comienza el proceso de ensilaje, el cuál puede dividirse de la siguiente manera:

- a. Fase aeróbica. Es una fase de poca duración, ya que el poco oxígeno que queda dentro, disminuye rápidamente por la respiración de la materia vegetal y a los microorganismos como bacterias y levaduras. Además, se da comienzo a una importante actividad enzimática (proteasas y carbohidrasas), siempre y cuando el pH se mantenga en un rango de 6.5-6.0.
- b. Fase de fermentación. Una vez que el ambiente se vuelve anaerobio, la duración de esta fase puede variar de días a semanas dependiendo de las características del material utilizado para su elaboración. Si la fermentación se desarrolla de manera correcta, la actividad de las bacterias ácido-lácticas se convierte en la población dominante. En este punto, el pH baja a valores entre 3.8 y 5.0 debido a la producción de ácido láctico y otros ácidos.
- c. Fase estable. Mientras el ambiente se mantenga libre de aire realmente ocurren pocos cambios. La mayoría de los microorganismos que se desarrollaron en la fase anterior, desaparecen lentamente, aunque existen algunos microorganismos acidófilos que logran sobrevivir como pueden ser clostridios y bacilos que sobreviven como esporas. Sin embargo, llegan a existir bacterias acidófilas o ácido-resistentes indeseables como *Acetobacter spp* (productora de acetato, CO<sub>2</sub> y agua) o *Clostridium spp* (forma endoesporas fermentadoras de carbohidratos y proteínas) cuya presencia disminuye la calidad nutricional del ensilado.
- d. Fase de deterioro aeróbico. Una vez que el silo ha sido abierto y se ha expuesto al aire comienza el proceso de deterioro, el cual podemos dividir en dos etapas. La primera, donde se inicia la degradación de los ácidos, encargados de la conservación del forraje, producidos durante la fermentación aumentando el pH y abriendo paso a la segunda etapa en la cual ocurre un aumento de temperatura permitiendo la proliferación de bacilos que provocan del deterioro del ensilaje, además de demás microorganismos aerobios como levaduras y enterobacterias

## 6.2 Fermentación

La microflora del ensilado es la clave para el éxito de la conservación del forraje, pues es la responsable de la fermentación para lograr la acidificación adecuada del ensilado. Según Martínez-Fernández *et al.* (2014) dicho proceso de fermentación está compuesto por las siguientes etapas:

- a. Fermentación acética. Una vez que han muerto las células vegetales, y con la aparición de las enterobacterias, se inicia la producción de ácido acético siempre y cuando la temperatura se encuentre en un rango de temperatura del 18-25°C y desaparece al alcanzar un pH de 4.2. posteriormente desaparecen siendo reemplazadas por cocos lácticos.
- b. Fermentación láctica. En condiciones ideales, se presenta como la última etapa y se lleva a cabo por las bacterias lácticas encargadas de la degradación de azúcares y demás carbohidratos solubles que se encuentren presentes en el forraje hasta obtener ácido láctico. Dichas bacterias necesitan un ambiente en el que el pH se encuentre entre 3-4 y condiciones de anaerobiosis. Al final son inhibidas debido a la escasez de azúcares solubles y la acumulación de ácido láctico (Martínez-Fernández *et al.*, 2014).

## 6.3 Uso de aditivos

Desde la década de 1990 se ha hecho uso de la inclusión de aditivos como coadyuvantes para mejorar las condiciones del proceso de ensilaje. Una mala fermentación puede deberse al déficit de carbohidratos solubles disponibles en el forraje, así como las carencias en el manejo, acondicionamiento y cierre del silo; la contaminación, fallos humanos y/o mecánicos de cualquier tipo, repercutirán indudablemente en el proceso de ensilaje retrasando el proceso de fermentación. A pesar de que los aditivos serán beneficiosos para la condición ambiental del ensilado, no hay que olvidar que ningún aditivo llega a substituir un buen manejo en el proceso de ensilaje (Martínez-Fernández *et al.*, 2014; Stefanie *et al.*, 2001; Paulo, 2001).

Existen diferentes aditivos que pueden ser utilizados y su elección debe basarse, primeramente, en función de la calidad fermentativa a brindar así como su respuesta

sobre la estabilidad aeróbica con respecto a la producción de efluentes y poder contaminante del mismo y finalmente, sobre la respuesta animal (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). Encontramos inóculos como la melaza o el maíz triturado que funcionan como una fuente de azúcares solubles para las bacterias productoras de ácido láctico, mientras que otra opción puede ser el uso de inóculos bacterianos que pueden acelerar y mejorar el proceso de ensilaje (Garcés-Molina *et al.*, 2004).

A partir de esto y de acuerdo con Martínez-Fernández *et al.*, (2014), los aditivos pueden clasificarse en dos grupos:

- a. Aditivos restrictores: encargados de la inhibición de fermentaciones indeseables ya sea mediante una acidificación inicial para dar prioridad a la proliferación de bacterias lácticas, o bien, teniendo una acción bacteriostática para limitar la multiplicación de bacterias indeseables, sin embargo, puede llegar a afectar el proceso de acidificación puesto que existen bacterias lácticas que se ven afectadas, aun así, se logra la conservación de la mayor parte de los azúcares. Dentro de este grupo se incluyen: ácidos minerales, ácidos orgánicos y sales de ácidos orgánicos e inorgánicos.
- b. Aditivos estimuladores de la fermentación: altamente populares debido a su reducción en cuanto a pérdida de nutrientes y el mejoramiento de la digestibilidad y metabolismo de nitrógeno en el rumen. La estimulación puede lograrse ya sea por la adición de microorganismos productores de ácido láctico, por acción de enzimas degradadoras de la pared celular de los forrajes, liberando sustratos fermentables; o bien, por adición de nutrientes que promuevan la fermentación láctica. A este grupo aunamos aditivos como inoculantes, enzimas, inoculantes asociados a enzimas, nutrientes y absorbentes.

## JUSTIFICACIÓN

Debido a los efectos del cambio climático en la alteración de los patrones de lluvia en cuanto a cantidad de las precipitaciones y la distribución de las lluvias con periodos secos más prolongados, la actividad pecuaria enfrenta dificultades para la producción de forrajes en cantidad y calidad suficiente para alimentar sus hatos y rebaños, lo cual impacta de manera negativa la producción de alimentos para consumo humano.

Esto requiere la investigación de alternativas en las estrategias de alimentación del ganado que aporten los nutrientes necesarios para satisfacer las necesidades básicas de los animales pero que a su vez les permitan ser eficientes productivamente.

Así mismo es necesario incrementar los estudios acerca de alternativas forrajeras que se pueden implementar mediante la incorporación de plantas forrajeras que no son comunes en los sistemas convencionales de producción animal, pero que representen opciones ante los retos que representa el cambio climático como baja disponibilidad de agua para riego, y cambios en la cantidad y distribución de las lluvias.

El nopal, además de ser una planta de origen mexicano, a diferencia de algunos otros forrajes alternativos, es altamente resistente a los cambios en la temperatura ambiental y al déficit hídrico y es posible cultivarlo en prácticamente cualquier zona del país.

Por lo anterior, este proyecto contribuye al conocimiento sobre el ensilado esta planta como posibilidad para la época de escasez en sistemas de producción de leche en pequeña escala, evaluando el valor nutricional *in vitro* del ensilado de nopal forrajero solo con la inclusión de aditivos como un inóculo bacteriano o una solución de urea.

## PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Qué efecto tiene el uso de aditivos estimuladores de la fermentación sobre el valor nutricional del ensilado de nopal forrajero?

## HIPÓTESIS

No existen diferencias en el valor nutricional *in vitro* de ensilado de nopal forrajero con o sin aditivos como un inóculo bacteriano, una solución de urea o una combinación de inóculo con urea.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar el efecto del uso de aditivos, inóculo bacteriano, urea, e inóculo con urea sobre la composición química y digestibilidad *in vitro* de ensilado de nopal forrajero.

### Objetivos específicos

1. Elaborar micro-silos de laboratorio de nopal forrajero sin aditivos, con la inclusión de inóculo bacteriano, con la adición de solución de urea, o con la adición de una combinación de inóculo bacteriano y solución de urea.
2. Determinar la composición química y digestibilidad *in vitro* de los ensilados de nopal forrajero con o sin aditivos en términos de contenidos de cenizas (CN), proteína cruda (PC), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), extracto etéreo (EE), digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS), y energía metabolizable estimada (EM).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### MATERIAL BIOLÓGICO

Se utilizaron pencas de nopal forrajero sembrado en 2021 en una unidad de producción agropecuaria en Yuridia, Guanajuato, en la región de El Bajío, ubicada en las coordenadas 20° 12' 51" N y 100° 08' 19" W. La región es una meseta con una altitud media de 2,000 m, con un clima cálido sub-húmedo con lluvias en verano y una época seca en invierno – primavera, y una precipitación media anual de 700 a 900 mm (INEGI, 2010).

El cultivo de nopal fue a 1.0 m de distancia entre plantas y 1.5 m de distancia entre surcos. La fertilización se realiza con lombricomposta cada seis meses.

### MÉTODO

El trabajo consistió en la preparación de micro-silos de laboratorio siguiendo la metodología modificada a la descrita por Sainz-Ramírez *et al.* (2020). Los micro-silos se elaboraron en cubetas de plástico con tapa y capacidad de 4 L.

Las pencas de nopal se picaron con una picadora de forraje de laboratorio estacionaria obteniendo partículas con un tamaño de 2cm. En virtud del alto contenido de humedad del nopal forrajero, se adicionó rastrojo de maíz molido, y dado el bajo contenido de carbohidratos solubles se adicionó melaza de caña igualmente. Las proporciones en fresco fueron de 70% de nopal picado, 20% de rastrojo de maíz con mazorca molido, y 10% de melaza de caña, en peso fresco.

Se elaboraron un total de 20 micro-silos con 5 micro-silos por tratamiento, un tratamiento control sin aditivos y tres tratamientos con adición de aditivos (inóculo bacteriano y urea). Se registró el peso neto del forraje al momento de su elaboración e inmediatamente después de su apertura a los 28 días.

### Tratamientos

El nopal forrajero picado se dividió en cuatro porciones de peso semejante para cada uno de los tratamientos (peso fresco); y de manera manual se preparó la mezcla base de 70% de nopal forrajero picado, 20% de rastrojo de maíz con

mazorca molido, y 10% de melaza de caña en peso fresco, y se elaboraron los siguientes tratamientos:

- I. Control (Tx C) = Testigo sin aditivo.
- II. Inoculante (Tx I) = La mezcla base del Tx C (nopal, rastrojo con mazorca y melaza) adicionado de un inoculante bacteriano comercial para ensilaje (Biosile) a base de bacterias lácticas homofermentativas *Pediococcus pentosaceus* y *Lactobacillus plantarum* a dosis recomendada por el fabricante ( $1 \times 10^5$  ufc/g de forraje).
- III. Solución de urea (Tx U) = La mezcla base de Tx C más una dosis de 0.5% de urea de peso total del forraje en fresco.
- IV. El inoculante más la urea (Tx I/U) en las dosis anteriormente descritas.

Los aditivos fueron añadidos al momento de la elaboración de los microsilos y abiertos 28 días después.

### **Análisis químico**

Las muestras se secaron en una estufa de aire forzado a 55°C hasta alcanzar un peso constante, para a continuación ser molidas en un molino Pulvex y tamizadas en una malla de 1 mm (Elshereef *et al.*, 2020)

Las muestras se analizaron para: cenizas (CN) por incineración a 550°C (AOAC, 1990), proteína cruda (PC) por el método de Kjeldahl ( $N \times 6.25$ ), fibra detergente neutro (FDN) con adición de alfa-amilasa y fibra detergente ácido (FDA) mediante el método de microbolsas (Ankom Technology, 2014a; 2014b) derivado de la metodología descrita por Van Soest *et al.* (1991), extracto etéreo (EE) (AOAC, 1990), y el pH se determinó con un electrodo de pH.

La digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) se determinó mediante la técnica de la microbolsa con líquido ruminal en un fermentador Ankom Daisy (ANKOM, 2023) con líquido ruminal obtenido por sonda nasogástrica de tres vacas lecheras donantes.

El análisis estadístico se realizó bajo un diseño completamente al azar, con 4 tratamientos y 5 repeticiones por tratamiento, según lo establecido por Kaps y

Lamberson (2004). Los datos se procesaron con el programa estadístico Minitab versión 14 de acuerdo con el modelo (Kaps y Lamberson, 2004):

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

Donde  $\mu$  es la media general,  $T_i$  es el efecto debido Tratamientos ( $i=1 \dots 4$ ), y  $e_{k(ij)}$  es el error experimental.

## LÍMITE DE ESPACIO

### Localización

El experimento se realizó con la colaboración de un productor de cabras en pequeña escala, quien aportó las raquetas de nopal forrajero para el experimento. La unidad de producción donde está el cultivo de nopal se ubica en el municipio de Yuridia, Guanajuato ubicada en las coordenadas  $20^{\circ}10'59.6''N$  y  $101^{\circ}23'50.1''O$ . La región es una meseta con una altitud media de 2000 msnm, un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano y un clima seco temporada en invierno, y una precipitación media de 600-700 mm/año.



La elaboración de cinco micro-silos de laboratorio por tratamiento se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), ubicado en El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México.

## LÍMITE DE TIEMPO

La elaboración de los micro-silos se realizó al día siguiente del corte de las pencas y el proceso de fermentación se llevó a cabo durante 28 días.

### Cronograma

<b>Actividad</b>	<b>Fecha</b>
Corte de las pencas	Mayo 2024
Elaboración de los silos de laboratorio	Mayo 2024
Apertura de los silos	Junio 2024
Secado de las muestras	Junio 2024
Molido de las muestras	Junio 2024
Inicio del análisis de laboratorio	Junio 2024
Término del análisis de laboratorio	Julio 2024
Análisis e interpretación de los resultados	Agosto 2024
Redacción de tesis	Agosto 2024

## RESULTADOS

En el Cuadro 1 se presentan los resultados de la composición química de los ensilados de nopal con respecto a los diferentes tratamientos de aditivos. La información presentada muestra que se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.01$ ) para los valores de MO, siendo el tratamiento con urea el de mayor valor; de forma similar se observan los resultados de PC los cuales también presentan diferencias significativas ( $P < 0.000$ ) teniendo valores mayores en los tratamientos de urea e inóculo con urea.

Finalmente, se muestran diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.042$ ) para DIVMS donde resalta nuevamente el resultado obtenido en el tratamiento con urea. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los valores de MS, FND Y FDA.

**Cuadro 1. Composición química de los microsilos elaborados con nopal forrajero, rastrojo de maíz con mazorca molido y melaza de caña, adicionados con diferentes aditivos (g/kg MS).**

Variable	C	I	U	IU	EEM	P
MS	247.06	247.11	283.78	283.2	6.78	0.18
MO	851.46 <sup>ab</sup>	843.99 <sup>a</sup>	861.54 <sup>b</sup>	859.89 <sup>b</sup>	2.28	<0.010
FDN	549.82	571.3	507.38	508.54	13.1	0.228
FDA	421.73	424.02	400.02	391.27	7.43	0.334
PC	50.55 <sup>a</sup>	56.18 <sup>a</sup>	84.9 <sup>b</sup>	80.66 <sup>b</sup>	3.5	<0.000
DIVMS	538.4 <sup>b</sup>	546.8 <sup>b</sup>	577.3 <sup>a</sup>	553.4 <sup>b</sup>	15.4	<0.042

C= Tratamiento control; I= Tratamiento inóculo bacteriano; U= Tratamiento urea; IU= Tratamiento inóculo/urea; MS= Materia seca; MO= Materia orgánica; FDN= Fibra Detergente Neutro; FDA= Fibra Detergente Ácido; PC= Proteína cruda; EEM= Error Estándar de la Media; P= Probabilidad estadística. <sup>a, b</sup> por filas  $P < 0.05$

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de presencia de colonias de hongos, número de colonias, temperatura y pH.

**Cuadro 2. Resultados del número de colonias de hongos, tamaño de las colonias, temperatura y pH de los microsilos elaborados con nopal forrajero, rastrojo de maíz con mazorca molido y melaza de caña, adicionados con diferentes aditivos**

Variable	C	I	U	IU	EEM	P
Número de colonias de hongos	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.848
Tamaño de las colonias (cm)	4.6	6.6	0.2	4.4	1.68	0.623
Temperatura (°C)	18.5	18.08	18.26	18.02	0.16	0.766
pH	4.07 <sup>a</sup>	3.61 <sup>c</sup>	4.01 <sup>ab</sup>	3.94 <sup>bc</sup>	0.05	<0.001

C= Tratamiento control; I= Tratamiento inóculo; U= Tratamiento urea; IU= Tratamiento inóculo/urea; EEM= Error Estándar de la Media; P= Probabilidad estadística. <sup>a, b, c</sup> por filas P<0.05

Se encontró que la presencia de hongos fue numéricamente mayor en los tratamientos control e inóculo con el doble de colonias en promedio que los tratamientos urea e inóculo con urea, pero las diferencias no fueron estadísticamente significativas (P>0.05).

En cuanto al tamaño de las colonias, si bien las diferencias no fueron estadísticamente significativas, se observó una reducción numérica considerable en el tratamiento con urea.

Igualmente, no hubo diferencias estadísticamente significativas (P>0.05) en la temperatura de los ensilados al momento de la apertura de los micro-silos, estando en torno a una temperatura ambiente del laboratorio de 18 °C.

Los niveles de pH se encuentran más altos en el tratamiento control (11.25%) y con un valor menor en el tratamiento con inóculo, pero se observaron diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) en los valores de pH, con el menor valor para el tratamiento con inóculo.

## DISCUSIÓN

En lo que refiere a los resultados obtenidos de MS otros autores reportan valores mayores a los obtenidos en este trabajo (Abidi *et al.*, 2013; Miranda-Romero *et al.* 2019; Kubitschek-Bervenuto da Silva *et al.*, 2022; Araiza-Rosales *et al.*, 2021; Siqueira *et al.*, 2021), mientras que Sá *et al.* (2020) en un experimento similar, en el que se evaluaron las características fermentativas y la composición química de ensilado de nopal cochinilla sometido a cuatro tratamientos distintos (C: tratamiento control, U: adición de urea, LB: adición de *Lactobacillus buchneri* y U+LB: adición de urea y *L. buchneri*) aperturados a los 60 y 120 días, obtuvo valores menores de MS; lo que pudo deberse a la falta de un forraje extra con un contenido de MS mayor al del nopal en comparación con otros autores que adicionan heno de avena, pasta de olivo (Abidi *et al.*, 2013) o rastrojo de maíz como es el caso de Miranda-Romero *et al.* (2018) y del presente experimento.

Por otro lado, Siqueira *et al.* (2022) reportaron valores muy parecidos de MS en ensilados de cladodios del género *Opuntia* y *Nopalea* adicionados con urea/sulfato de amonio y bagazo de caña de azúcar con valores de 253g/kg y 267g/kg respectivamente.

Los valores que se obtuvieron de MO en los ensilados de nopal son menores a los que se reportaron en Brasil, Siqueria *et al.* (2022) con un valor de 876g/kg para el ensilado elaborado con pencas del género *Nopalea* y 887g/kg para el género *Opuntia*, mientras que en otros experimentos el dato no es reportado.

Diferentes autores coinciden en que el contenido de FDN depende del contenido de fibra de los forrajes (Sá *et al.*, 2020; Da Silva *et al.*, 2022; Herrera-Torres *et al.*, 2014, Araiza-Rosales *et al.*, 2021), así como de lignina. Un forraje con mayor cantidad de lignina presentará mayores niveles de FDN (Kubitschek-Bervenuto da Silva *et al.*, 2022). Sin embargo, en el experimento realizado por Sá *et al.*, (2020) los valores de FDN fueron menores a los observados en este experimento, tanto a los 60 días como a los 120 días de apertura y aunque puede atribuirse a la falta de una fuente alterna de fibra, según el mismo autor, estos valores pudieron ser afectados por el paso del tiempo debido a la hidrólisis producida por las enzimas de la planta y al

igual que este trabajo, el tratamiento con urea fue quien obtuvo los valores menores lo cual puede atribuirse a la hidrólisis alcalina que resulta del hidróxido de amonio con los enlaces éster de los carbohidratos estructurales,.

De igual modo, Sainz-Ramírez *et al.* (2023) en un trabajo realizado con ensilado de haba adicionado con urea, se reportó una disminución en el contenido de fibras. Se considera válido contrastar resultados de estudios con otros forrajes, puesto que es el efecto que ocasiona la adición de urea sobre el contenido de fibra en cualquier forraje, es el mismo, aunque la variabilidad de los resultados si depende del tipo de forraje.

Abidi *et al.* (2013) reportaron valores similares de FDN (547g/kg MS) a los resultados del tratamiento control de acuerdo con un experimento en el que se elaboró ensilado de nopal sin aditivos químicos o microbiológicos al igual que Miranda-Romero *et al.* (2018) con un valor de 508g/kg. MS

En un estudio realizado por Ruíz *et al.* (2009) en el que se evaluaron los efectos de enzimas e inoculantes sobre la composición química de ensilados de maíz de distintas variedades y en diferentes etapas, coincide en que los tratamientos adicionados con inóculos bacterianos obtuvieron resultados mayores tanto de FDN como de FDA, lo cual puede atribuirse a que existe una mayor utilización de las fracciones solubles de la planta por parte de las bacterias ácido-lácticas.

Los resultados obtenidos de PC para los ensilados adicionados con urea coinciden con lo señalado por Sá *et al.* (2020) donde el tratamiento con el valor mayor fue aquel en el que se agregó el mismo aditivo; debido al aporte de la urea en términos de nitrógeno no proteico al ensilado.

Sin embargo, en un trabajo realizado en Durango, México, donde se evaluó la calidad nutricional de nopal forrajero adicionado con dos inóculos bacterianos distintos, se afirmó que éstos también pueden elevar los valores de PC debido a que un aumento en la concentración de levaduras además del contenido de nitrógeno total del nopal (Herrera-Torres *et al.*, 2014). En este experimento, los tratamientos adicionados con inóculo bacteriano e inóculo con urea resultaron en

valores mayores de PC con respecto al control y al tratamiento con inóculo, por el aporte de N dado por la urea.

En relación con el aumento significativo en la DIVMS en el tratamiento con urea, García-Martínez *et al.* (2020) mencionaron que en los forrajes tratados con urea se presenta un efecto sobre la celulosa y la hemicelulosa hinchando las fibras y rompiendo los enlaces de lignina, volviéndolas así más digeribles. Si a esto sumamos lo propuesto por Sá *et al.* (2020), donde se afirma que, al haber una menor cantidad de lignina en el nopal, en comparación con otros forrajes con mayor cantidad de fibras, este se vuelve más digerible, entonces se puede explicar el por qué la DIVMS fue mayor en el tratamiento adicionado con urea.

Los niveles de pH son menores a los señalados por distintos investigadores (Abidi *et al.*, 2013; Sá *et al.*, 2020; Miranda-Romero *et al.*, 2018; Araiza-Rosales *et al.*, 2021). Los valores aquí reportados se encuentran dentro del parámetro ideal. Niveles de pH de 3.8-5.0 indican que existe una dominancia de las bacterias ácido-lácticas y consecuentemente una acumulación de ácido láctico que inhibe el crecimiento de microorganismos indeseables, de acuerdo con Miranda-Romero *et al.* (2018) el valor del pH en ensilados de nopal puede estar determinado por la presencia del mucilago que llega a tener un efecto buffer.

## CONCLUSIÓN

Se concluye que los ensilados de nopal forrajero adicionados con 20% de rastrojo de maíz con mazorca molido tienen buenas variables de calidad fermentativa con un pH menor a 4.5.

Los tratamientos con urea tienen la ventaja de incrementar la proteína cruda a niveles suficientes para cubrir los requerimientos mínimos de mantenimiento y de crecimiento moderado de bovinos (NRC, 2000), por lo que la adición de urea es una alternativa viable para aumentar el contenido de proteína cruda de los ensilados de nopal con rastrojo de maíz con mazorca. En consecuencia, el valor proteico y digestible de los ensilados tratados con urea es mayor dado el incremento en la digestibilidad de la materia seca.

Por lo anterior, se concluye que el tratamiento con urea de ensilados de nopal forrajero adicionados con 20% de rastrojo de maíz con mazorca molido y 10% melaza (ambos en base fresca) son una opción viable, gracias a su aporte nutricional, como una alternativa forrajera para la alimentación de rumiantes.

## REFERENCIAS

- Abidi, S., Salem, H. Ben, Oliviers, R., & Valdisavoia, V. (2013). Silage Composed of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* Cladodes, Olive Cake and Wheat Bran as Alternative Feed for Barbarine Lamb. *Acta Horti*, 995, 297–302.
- Álvarez-García, C. D., Arriaga-Jordán, C. M., & López-González, F. (2022). Valor nutricional in vitro de heno de triticale asociado con ebo para sistemas de producción de leche en pequeña escala. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(28), 0–2.
- Anaya-Pérez, M. A., & Bautista-Zane, R. (2008). El nopal forrajero en México: del siglo XVI al siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 5(2), 167–183. <https://www.revista-asyd.org/index.php/asyd/article/view/1078/422>
- Aparicio-Ortuño, R., & Ortega-Regules, A. E. (2018). El Nopal (*Opuntia ficus indica*), propiedades y beneficios. *Repositorio Universidad de Las Américas Puebla*, 3–6.
- Araiza-Rosales, E., González-Arreola, A., Pánames-carrasco, G., Murillo-Ortiz, M., Jiménez-Ocampo, R., & Herrera-Torres, E. (2021). Calidad fermentativa y producción de metano en ensilados de rastrojo de maíz adicionados con nopal fermentado y sin fermentar Fermentative quality and methane production in corn stover silage with fermented and unfermented nopal cactus | En el *Abanico Veterinario*, 11, 1–13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21929/abavet2021.24>
- Arriaga-Jordán, C. M., Albarrán-Portillo, B., Espinoza-Ortega, A., García-Martínez, A., & Castelán-Ortega, O. A. (2002). On-farm comparison of feeding strategies based on forages for small-scale dairy production systems in the highlands of central Mexico. *Expl Agric.*, 38, 375–388. <https://doi.org/10.1017/S0014479702000418>
- Avilés-Ruiz, R., Barron-Bravo, O. G., Gutiérrez-Chávez, A. J., & Ruiz-Albarrán, M.

- (2024). Principales sistemas de producción de leche de bovinos en México : recopilación actual de parámetros productivos , reproductivos y de manejo. *Ciencias Veterinarias y Producción Animal*, 1(2), 32–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.29059/cvpa.v1i2.16>
- Basurto-Hernández, S., Galindo-Paliza, L. M., & Ríos-Mohar, J. (2023). Impactos económicos potenciales del cambio climático en la ganadería : caso de México. *Revista Latinoamericana de Economía*, 54(212), 27–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2023.212.69916>
- Basurto, G. R., Ramírez, R. E., Gómez, R. S., Méndez, R. H., & Bonilla, C. N. (2014). Evaluación para el ensilaje de nopal y vaina de mezquite para el crecimiento de ovinos en corral. *Reuniones Nacionales de Investigación e Innovación Pecuaria, Agrícola, Forestal y Acuícola-Pesquera*, 2–3. <https://doi.org/10.13140/2.1.2680.0641>
- Cano-Cardozo, N. ., & Valencia-Trujillo, L. (2018). Matarratón (*Gliricidia sepium*), Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y Morera (*Morus alba*) tres especies forrajeras usadas como alternativa en la alimentación de conejos: revisión sistémica y metanálisis. *Repositorio Institucional UNAD.*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2779>
- Carrillo-Hernández, S., Velarde-Guillen, J., López-González, F., & Arriaga-Jordán, C. M. (2023). Mixed small grain cereal silages in the feeding of dairy cows in small scale dairy systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(85), 1–11. <https://doi.org/http://doi.org/10.56369/tsaes.4837>
- Díaz-Plascencia, D., Rodríguez-Muela, C., Mancillas-Flores, P., Ruíz-Holguín, N., Mena-Mungía, S., Salvador-Torres, F., & Duran-Melendez, L. (2012). Fermentación in vitro de nopal forrajero con un inóculo de levadura *Kluyveromyces lactis* obtenida a partir de manzana de desecho. *Revista Electronica de Veterinaria*, 13(1).
- Estrada-Porrúa, F., Zavala-Hidalgo, J., Martínez-Arroyo, A., Raga, G., & Gay-García, C. (2023). *Estado y perspectivas del cambio climático en México: un*

- punto de partida* (R. D. Martínez-Ramírez & G. Mendiola-Patiño (eds.); 1st ed.). UNAM. <https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/11/estado-y-perspectivas-del-cambio-climatico-en-mexico-un-punto-de-partida-unam.pdf>
- FIRA. (2021). *Panorama Agroalimentario: Leche y lácteos 2021*. <https://sursureste.org.mx/wp-content/uploads/2023/01/Panorama-Agroalimentario-Leche-y-Lacteos-2021.pdf>
- Flores-Hernández, A., Macías-Rodríguez, F. J., Meza-Herrera, C., Esquivel-Arriaga, O., Ortiz-Salazar, J., & Hernández-Bautista, C. (2019). Semi-solid fermentation of nopal ( *Opuntia* spp ) for use as an animal protein supplement. *Revista de Geografía Agrícola*, 63, 87–100. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2019.63.04>
- Garcés-Molina, A. M., Berrio-Roa, L., Ruiz-Alzate, S., Serna de León, J. G., & Builes-Arango, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 66–71.
- García-Martínez, A., López-González, F., Prospero-Bernal, F., Albarrán-Portillo, B., & Arriaga-Jordán, C. M. (2020). Evaluación de rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) tratado con urea como una alternativa en la suplementación de vacas lecheras en sistemas de producción de leche en pequeña escala. *Agro Productividad*, 13(2), 11–17. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1628>
- Hernández-Morales, P., Estrada-Flores, G., Avilés-Nova, F., Yong-Ángel, G., López-González, F., Solís-Méndez, D., & Castelán-Ortega, O. A. (2013). Tipificación de los sistemas campesinos de producción de leche del sur del estado de México. *Universidad y Ciencia. Trópico Húmedo*, 29(1), 19–31.
- Herrera-Torres, E., Murillo, M., Berumen, L., Paez, J., y Villareal, G. (2014). Efecto de *Sacharomyces cerevisiae* y *Kluyveromyces marxianus* durante el tiempo de fermentación en la calidad nutritiva del nopal forrero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1 (1), 33 - 40.
- Kubitschek-Bervenuto da Silva, J., García-Leal de Araujo, G., Mauro-Santos, E., Silva de Oliveira, J., Sena-Campos, F., Costa-Gois, G., Santos-Silva, T., Gómez

- da Silva-Matías, A., Lolato-Ribeiro, O., Fernandes-Perazzo, A., & Moura-Zanine, A. (2022). Rendimiento de corderos alimentados con ensilaje como alimento total a base de nopal. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 13, 19–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i1.5849>
- López-Jara, A. G., Reta-Sánchez, D. G., Reyes-González, A., Iván-Santana, O., López-Calderón, M. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2022). Composición nutritiva y productividad de forrajes alternativos de otoño- invierno en diferentes fechas de siembra del norte de México Resumen Materiales y métodos. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 28, 125–135.
- Martínez-Fernández, A., Argamentoría-Gutierrez, A., & Roza-Delgado, B. (2014). *Manejo de forrajes para ensilar* (Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) (ed.); 1st ed.). I. Gofer.
- Martínez-López, J. M., Vázquez-Alvarado, R. E., Gutierrez-Ornela, J. A., Valdez-Zepeda, R. D., De los Ángeles-Peña, M., & López-Cervantes, R. (2009). Calidad nutricional y rendimiento de nopal forrajero abonados orgánicamente. *Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación*, 1(May 2016), 7.
- Medina-García, G., Zegbe, J. A., Ruíz-Corral, J. A., Casa-Flores, J. I., & Rodríguez-Moreno, V. (2021). Influence of climate change on thermal requirements of cactus pear ( *Opuntia spp.* ) in Central-Northern of Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 800, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1007>
- Miranda-Romero, L. A., Vazquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., & Aranda-Osorio, G. (2019). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 196–215. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v20i.37>
- Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- NMX-FF-068-SCFI-2006, 1.
- NRC - National Research Council (2000). Nutrient Requirements of Beef

Cattle:Seventh Revised Edition: Update 2000. Washington, DC: The National Academies

Paulo, R. F. (2001). Aditivos para mejorar el ensilaje de los forrajes tropicales. In L. Mannelje (Ed.), *Ensilaje de los trópicos* (pp. 157–172). FAO. <https://n9.cl/9lv4w>

Ramírez-Ramírez, H. A. (2016). Aplicación de Principios de Nutrición de Ganado Lechero en la Producción de Leche y Carne con Ingredientes Tradicionales y Alternativos. *Ceiba*, 54(1), 66–71. <https://doi.org/10.5377/ceiba.v54i1.2781>

Reta-Sánchez, D. G., Figueroa-Viramontes, U., Serrato-Corona, J. S., Quiroga-Garza, H. M., Gaytán-Mascorro, A., & Cueto-Wong, J. A. (2015). Potencial forrajero y productividad del agua en patrones de cultivos alternativos Forage potential and water productivity in alternative cropping patterns. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 6(871), 153–170.

Ruíz, B. O., Castillo, Y., Anchondo, A., Rodríguez, C., Beltrán, R., La O, O., & Payán, J. (2009). *Efectos de enzimas e inoculantes sobre la composición del ensilaje de maíz*. 58(222), 163–172.

Sá, W. C. C. S., Santos, E. M., De Oliveira, J. S., De Araujo, G. G. L., Perazzo, A. F., Da Silva, A. L., Pereira, D. M., César Neto, J. M., Santos, F. N. S., & Leite, G. M. (2020). Fermentative characteristics and chemical composition of cochineal nopal cactus silage containing chemical and microbial additives. *Journal of Agricultural Science*, 158(7), 574–582. <https://doi.org/10.1017/S0021859620000829>

SAGARPA. (2012). *México: el sector agropecuario ante el desafío del cambio climático*. <https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2019/01/28/1608/01022019-cambio-climatico.pdf>

Sainz-Ramírez, A., Estrada-Flores, J. ., Velarde-Guillén, J., López-González, F., & Arriaga-Jordán, C. . (2023). Efecto de aditivos en la composición química de ensilados de haba (*Vicia faba*). *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 249–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.53588/alpa.310543>

- Sánchez-Duarte, J. I., Reta-Sánchez, D. G., Ochoa-Martínez, E., & Reyes-González, A. (2018). Forrajes alternativos: una opción sustentable para la lechería en México. *Ganadería SOS*. <https://ganaderiasos.com/forrajes-alternativos-una-opcion-sustentable-para-la-lecheria-en-mexico/>
- Sánchez-valdés, J. J., Vega-garcía, J. I., Colin-navarro, V., Gómez-Miranda, A., Marín-Santana, M. N., Ávila-González, R., Jaimez-García, A. S., Heredia-Nava, D., Domínguez-Vera, I. A., Arriaga-Jordán, C. M., & López-González, F. (2023). Festulolium and annual ryegrass pastures associated with white clover for small-scale dairy systems in high valleys of Mexico. *Agro Productividad*, 16(4), 31–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.32854/>
- SIAP. (2023). *Panorama Agroalimentario 2023*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- SINACC. (2021). *Impactos del cambio climático en México*. <https://cambioclimatico.gob.mx/impactos-del-cambio-climatico-en-mexico/>
- Siqueira, M., Chagas, J., Monnerat, J. P., Monteiro, C., Mora-Luna, R., Dubeux, J., Dilorenzo, N., Ruiz-Moreno, M., & Ferreira, M. (2021). Nutritive value, in vitro fermentation, and methane production of Cactus Cladodes, sugarcane Bagasse, and Urea. *Animals*, 11(5), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ani11051266>
- Stefanie, J. W. H., Elferink, O., Driehuis, F., Gottschal, J. C., & Spoelstra, S. F. (2001). Uso del ensilaje en el trópico privilegiando opciones para pequeños campesinos. In L. Mannelje (Ed.), *Ensilaje en los trópicos* (pp. 17–30). FAO. <https://n9.cl/9lv4w>
- Torres-Sales, A. (2011). Composición Química Del Nopal Y Sus Implicaciones En La Nutrición De Rumiantes (Experiencias De Brasil). *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 143–151. <https://www.researchgate.net/publication/279513635>
- Urrutia-morales, J., Gómez-Vázquez, H. G., Beltrán-López, S., & Díaz-Gómez, M. O. (2014). Utilización de Artiplex canescens y Opuntia ficus indica en la alimentación de cabras lactantes durante la sequía. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 287–296.

- Velarde-Guillen, J., Estrada-Flores, J. G., Rayas-Amor, A. A., Vicente, F., Martínez-Fernández, A., Heredia-Nava, D., Celis-Alvarez, M. D., Aguirre-Ugarte, I. K., Galindo-González, E., & Arriaga-Jordán, C. M. (2019). Supplementation of dairy cows with commercial concentrate or ground maize grain under cut-and-carry or grazing of cultivated pastures in small-scale systems in the highlands of central Mexico. *Animal Production Science*, 59, 368–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/AN15375>
- Villa-Herrera, A., Nava-Tablada, E., López.Ortíz, S., Vargas-López, S., Ortega-Jimenez, E., & Gallardo-López, F. (2009). Utilización del guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(2), 253–261.