

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL



Efecto de la adición de un precursor gluconeogénico sobre la producción y salud de cabras lecheras en sistema extensivo

Por:

Saul Said Armendariz Rodríguez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Efecto de la adición de un precursor gluconeogénico sobre la producción y salud de
cabras lecheras en sistema extensivo

Por:

Saúl Said Armendáriz Rodríguez

TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por:

T. D-11-2

Dr. Fernando Arellano Rodríguez
Presidente

Dr. Oscar Angel García
Vocal

Dr. Alán Sebastián Alvarado Espino
Vocal

MC. Mariana Barragán Arrañaga
Vocal suplente externo

MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal



Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Efecto de la adición de un precursor gluconeogénico sobre la producción y salud de
cabras lecheras en sistema extensivo

Por:

Saúl Said Armendáriz Rodríguez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el Comité de Asesoría:

T. A. 11-2

Dr. Fernando Arellano Rodríguez
Asesor Principal

[Signature]
Dr. Oscar Ángel García
Coasesor

[Signature]
Dr. Alán Sebastián Alvarado Espino
Coasesor

[Signature]
MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026



AGRADECIMIENTOS

A mi padre, Vicente Saúl Armendáriz Franco, quien con su trabajo diario en el rancho me enseñó que el campo no solo se trabaja, se vive y se defiende. A pesar de las temporadas de sequía y las dificultades propias del medio rural, nunca flaqueó. Su constancia, fortaleza y compromiso han sido un ejemplo permanente de resiliencia y determinación. Gran parte de lo que hoy soy profesionalmente nace de lo que aprendí observándolo trabajar.

A mi madre, Rita Velia Rodríguez Ortiz, por su amor incondicional, su apoyo constante y su fe inquebrantable en mí. Gracias por ser mi sostén emocional y por impulsarme siempre a seguir adelante aun cuando el camino parecía difícil.

A mi hermana, Idali Isabelle Armendáriz Rodríguez, quien me acompañó durante estos cinco años de carrera, compartiendo sacrificios, alegrías y retos. Gracias por tu apoyo, tu paciencia y por estar presente en cada etapa de este proceso.

Agradezco profundamente al Dr. Fernando Arellano Rodríguez por la confianza depositada en mí y por brindarme la oportunidad de integrarme a este proyecto de investigación, permitiéndome crecer académica y profesionalmente.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a la MC. Mariana Barragán Arrañaga por su apoyo, orientación y colaboración en el desarrollo de esta investigación, así como por su disposición durante el trabajo experimental.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro, que no solo es académico, sino también personal y familiar.

DEDICATORIA

Dedico este logro, fruto de años de esfuerzo y aprendizaje, principalmente a mi padre, Vicente Saúl Armendáriz Franco, quien con su trabajo diario en el rancho me enseñó que la perseverancia y la disciplina son valores que se demuestran con hechos y no solo con palabras. Aun en las temporadas de sequía y en los momentos de mayor dificultad, nunca flaqueó, mostrándome que la fortaleza se construye enfrentando la adversidad con determinación. Su ejemplo ha sido la base de mi formación como profesionista y como persona.

A mi madre, Rita Velia Rodríguez Ortiz, por su amor incondicional, su paciencia infinita y su apoyo constante a lo largo de toda mi vida. Gracias por acompañarme en cada paso, por motivarme cuando el cansancio aparecía y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro también es suyo.

A mi hermana, Idali Isabelle Armendáriz Rodríguez, quien me acompañó durante estos cinco años de carrera, compartiendo sacrificios, metas, alegrías y momentos difíciles. Gracias por tu apoyo incondicional, por tu presencia constante y por ser parte fundamental de este camino.

Este trabajo representa más que un requisito académico; es el resultado del esfuerzo compartido, del apoyo familiar y de los valores que me inculcaron desde casa. A ustedes, que han sido mi impulso y mi fortaleza, dedico este logro con gratitud y orgullo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLA	iv
RESUMEN	v
Capítulo I	1
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
Hipótesis	3
Capítulo II	4
REVISION DE LITERATURA	4
1. Fisiología de la Gluconeogénesis en Rumiantes	4
1.1 Diferencias entre Rumiantes y Monogástricos en la Producción de Glucosa	4
1.2 Papeles del Hígado y el Riñón en la Gluconeogénesis	5
1.3 Rutas Metabólicas	6
1.4 Hormonas implicadas en la suplementación energética	7
2. Particularidades del Metabolismo Energético en Cabras en Sistemas Extensivos	8
2.1 Necesidades Energéticas Durante la Lactancia	8
2.2 Balance energético negativo en cabras lactantes	9
3. Fuentes de Precursores Gluconeogénicos en Sistemas Extensivos	10
Capítulo III	13
MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1. Área de estudio	13
3.2. Experimento	14
3.2.1. Recolección de muestras	15
Capítulo IV	21
DISCUSIÓN	21
Capítulo V	23
CONCLUSIONES	23

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLA

Figura 1 Producción diaria de leche (L/día) en cabras suplementadas con propionato de calcio.	16
Figura 2 Contenido de grasa en leche (%) durante el periodo experimental.	17
Figura 3 Concentración de proteína en leche (%).	18
Figura 4 Porcentaje de lactosa en leche (%).	19
Figura 5 Contenido de sólidos totales (%) en leche.	19
Figura 6 Sólidos no grasos (%) en leche.	20
Tabla 1 Hormonas relacionadas con el metabolismo energético y su papel en la gluconeogénesis y producción de leche en cabras lactantes.	7

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar el efecto de la adición de un precursor gluconeogénico, específicamente propionato de calcio, en la alimentación de cabras lecheras manejadas bajo un sistema extensivo en la Comarca Lagunera, Coahuila. Esta región se caracteriza por su clima árido y una limitada disponibilidad de recursos forrajeros, condiciones que frecuentemente provocan un desequilibrio energético en los animales, especialmente durante la etapa de lactancia. La gluconeogénesis, proceso mediante el cual los rumiantes sintetizan glucosa a partir de compuestos no glucídicos, es fundamental para mantener la producción de leche y las funciones metabólicas básicas; por ello, la suplementación con precursores gluconeogénicos representa una alternativa viable para mejorar la eficiencia productiva en sistemas de baja disponibilidad alimenticia.

Se trabajó con 30 cabras multirraciales, con características productivas similares, divididas en tres grupos: un grupo control (G0), un grupo con 3 gramos de suplemento (G3) y otro con 5 gramos (G5). A lo largo de seis semanas se evaluó la producción diaria de leche, su composición (grasa, proteína, lactosa, sólidos totales y no grasos), y se realizaron análisis hematológicos y bioquímicos para conocer el estado metabólico y energético de los animales.

En conjunto, los hallazgos indican que la suplementación moderada con propionato de calcio contribuye positivamente al balance energético de cabras lecheras manejadas en condiciones extensivas, ayudando a mantener su estado de salud y una producción más constante pese a las limitaciones nutricionales del sistema. Este tipo de estrategias nutricionales puede representar una herramienta práctica para mejorar la productividad caprina en zonas áridas del norte de México, promoviendo sistemas de producción más sostenibles y eficientes.

Palabras clave: Cabras lecheras, Precusores gluconeogénicos, Propionato de calcio, Metabolismo energético, Sistema extensivo

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

La caprinocultura en México representa una actividad pecuaria estratégica, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del país, donde las condiciones climáticas limitan otras formas de producción animal. En regiones como la Comarca Lagunera, que abarca parte de los estados de Durango y Coahuila, la cría de cabras constituye una fuente importante de proteína animal, ingresos familiares y aprovechamiento de recursos naturales marginales como matorrales y pastizales (SIAP, 2023).

Dentro de los sistemas de producción, el sistema extensivo predomina en áreas rurales con bajo acceso a insumos tecnológicos. Este sistema se caracteriza por el pastoreo libre en grandes extensiones de terreno con escasa o nula suplementación alimenticia. En estas condiciones, los animales dependen casi exclusivamente de la disponibilidad natural del forraje, lo cual repercute directamente en su estado nutricional y en procesos fisiológicos esenciales como la gluconeogénesis (Lomax y Baird, 1983). Este proceso es crucial para los rumiantes, ya que a diferencia de los monogástricos, no absorben glucosa directamente del intestino, por lo que dependen de la conversión de precursores no glucídicos como el propionato, glicerol y aminoácidos para satisfacer sus demandas energéticas (Dong et al., 2023).

Durante la lactancia, la gluconeogénesis cobra aún más importancia, dado que la glucosa es el sustrato principal para la síntesis de lactosa, componente clave de la leche. Sin embargo, en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes, como ocurre en los sistemas extensivos, es común que las cabras experimenten un

balance energético negativo. Esta situación obliga a los animales a movilizar sus reservas corporales, lo que puede comprometer tanto la producción de leche como su salud reproductiva y hematológica (González-Ronquillo y Balcells, 2012).

Estudios recientes han demostrado que la suplementación con concentrados energéticos en sistemas extensivos puede generar respuestas reproductivas y productivas positivas. Mellado et al. (2020), en una investigación realizada en cabras multirraciales en pastizales del norte de México, observaron que la suplementación con concentrados durante el empadre mejoró significativamente la tasa de gestación, número de crías por parto y la eficiencia reproductiva en general. Este hallazgo sugiere que estrategias nutricionales dirigidas, como la inclusión de precursores gluconeogénicos en la dieta, pueden desempeñar un papel clave en mejorar el rendimiento productivo y reproductivo de las cabras en ambientes de escasos recursos.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025), México cuenta con más de 8.8 millones de cabezas caprinas, siendo las entidades del norte las de mayor concentración. La Comarca Lagunera en particular, destaca como una región de gran importancia para la producción de leche caprina. Frente a este contexto, la implementación de estrategias de suplementación dirigidas podría tener un impacto considerable en la eficiencia y sustentabilidad de la producción caprina nacional.

La presente investigación se enfoca en evaluar el efecto de la adición de un precursor gluconeogénico (propionato de calcio y propanodiol) en la dieta de cabras lecheras, en un sistema de producción extensivo.

Objetivos

Evaluar el efecto de la adición de diferentes dosis de un precursor gluconeogénico (propionato de calcio) en la dieta de cabras lecheras manejadas en un sistema de producción extensivo en la Comarca Lagunera, con la finalidad de determinar su influencia sobre la producción y calidad de la leche, así como en el perfil hematológico (serie eritroide y leucocitaria, glucosa, lípidos y proteínas séricas), buscando establecer si esta estrategia nutricional contribuye a mejorar el estado energético de los animales y, en consecuencia, su desempeño productivo y de salud bajo condiciones de pastoreo y limitación de recursos forrajeros.

Hipótesis

La inclusión de precursores gluconeogénicos en la dieta de cabras lecheras bajo un sistema de producción extensivo permitirá contrarrestar el balance energético negativo característico de este tipo de manejo, favoreciendo una mayor disponibilidad de glucosa hepática a través de la gluconeogénesis.

Capítulo II

REVISION DE LITERATURA

1. Fisiología de la Gluconeogénesis en Rumiantes

1.1 Diferencias entre Rumiantes y Monogástricos en la Producción de Glucosa

En los rumiantes, los carbohidratos dietéticos son fermentados en el rumen, lo que impide la absorción directa de glucosa en el intestino delgado. Como resultado, estos animales dependen casi completamente de la gluconeogénesis hepática para mantener la glucemia (Aschenbach et al., 2010). A diferencia de los monogástricos, que absorben glucosa directamente, los rumiantes utilizan principalmente propionato, un ácido graso volátil (AGV) como precursor gluconeogénico (Zhang, 2011).

A diferencia de los monogástricos, estos animales no absorben glucosa directamente del intestino delgado, ya que los microorganismos ruminales la degradan antes de su llegada al intestino. Por ello, los rumiantes dependen en gran medida de la gluconeogénesis hepática para mantener los niveles adecuados de glucosa en sangre (Aschenbach et al., 2010).

En consecuencia la glucosa absorbida a nivel intestinal es mínima; por tanto, el hígado debe sintetizarla continuamente a partir de compuestos no carbohidratos, principalmente propionato, lactato, glicerol y algunos aminoácidos glucogénicos. Esta producción constante de glucosa es esencial para mantener funciones metabólicas vitales, como la síntesis de lactosa en la leche, el funcionamiento del sistema nervioso y la reproducción (Zhang et al., 2015; Dong et al., 2023).

La capacidad de realizar gluconeogénesis de manera sostenida es, por tanto, una adaptación metabólica clave de los rumiantes, que les permite sobrevivir y mantener su productividad incluso bajo dietas pobres en carbohidratos solubles.

1.2 Papeles del Hígado y el Riñón en la Gluconeogénesis

El hígado es el principal sitio de gluconeogénesis en rumiantes. Allí, el propionato, el lactato, el glicerol y ciertos aminoácidos son convertidos en glucosa para satisfacer las demandas energéticas del animal (Kristensen y Harmon, 2004).

El hígado es el principal órgano gluconeogénico en los rumiantes, responsable de transformar los precursores derivados del rumen (propionato, lactato, glicerol y alanina) en glucosa. Este proceso se regula finamente por hormonas como insulina, glucagón, cortisol y hormona del crecimiento, que modulan la expresión de enzimas clave como la fosfoenolpiruvato carboxiquinasa (PEPCK) y la glucosa-6-fosfatasa (Kristensen y Harmon, 2004; Zhang et al., 2016).

El riñón también contribuye a la gluconeogénesis, especialmente durante estados de ayuno prolongado o balance energético negativo, utilizando glutamina y lactato como sustratos principales. Aunque su participación es menor que la hepática, puede llegar a representar hasta un 20 % de la producción total de glucosa en condiciones de restricción alimenticia (van der Drift et al., 2012).

Esta coordinación entre hígado y riñón permite mantener una concentración estable de glucosa en sangre, garantizando energía continua para tejidos dependientes como el sistema nervioso central, la glándula mamaria y el feto durante la gestación.

1.3 Rutas Metabólicas

La gluconeogénesis inicia en la mitocondria con la carboxilación del piruvato a oxaloacetato por la piruvato carboxilasa. Luego, la enzima fosfoenolpiruvato carboxiquinasa (PEPCK) convierte este oxaloacetato en fosfoenolpiruvato (PEP), iniciando una serie de pasos que finalmente llevan a la formación de glucosa en el citoplasma (Bauman y Griinari, 2003).

La gluconeogénesis utiliza compuestos que no son carbohidratos como fuentes de carbono para sintetizar glucosa. En rumiantes, los principales precursores son el propionato, el lactato, el glicerol y ciertos aminoácidos. Entre ellos, el propionato es el más importante, ya que representa hasta 70 % de la glucosa producida en el hígado (Dong et al., 2023).

En bovinos y caprinos, el propionato se genera durante la fermentación ruminal de carbohidratos estructurales y no estructurales, y es absorbido a través de la pared ruminal hacia el hígado, donde se convierte en glucosa. Por su parte, el lactato y el glicerol derivan del metabolismo muscular y de los lípidos, respectivamente. Durante el balance energético negativo o la movilización de grasa corporal, el glicerol se vuelve una fuente gluconeogénica importante (Noro y Wittwer, 2012).

El control de la gluconeogénesis depende tanto del suministro de estos sustratos como de la regulación hormonal. Un adecuado aporte de precursores gluconeogénicos en la dieta puede mejorar el metabolismo energético y prevenir desórdenes como la cetosis subclínica, especialmente en animales en lactancia o gestación avanzada (Zhang et al., 2016).

1.4 Hormonas implicadas en la suplementación energética

El metabolismo energético de los rumiantes está regulado por varias hormonas que modulan la gluconeogénesis, la movilización de reservas y el uso de glucosa durante la lactancia. Durante la suplementación con precursores gluconeogénicos, el perfil hormonal suele mejorar: aumenta levemente la insulina, disminuye la movilización excesiva de lípidos y se estabiliza la disponibilidad de glucosa para la síntesis de lactosa (Dong et al., 2023).

Tabla 1 Hormonas relacionadas con el metabolismo energético y su papel en la gluconeogénesis y producción de leche en cabras lactantes.

Hormona	Órgano de origen	Función fisiológica principal	Papel en la gluconeogénesis	Relación con la producción de leche
Insulina	Páncreas (células β)	Favorece la captación de glucosa por tejidos; inhibe lipólisis.	Disminuye la gluconeogénesis al promover el uso periférico de glucosa.	Niveles adecuados favorecen la partición de nutrientes hacia la glándula mamaria; valores bajos en BEN reducen la disponibilidad de glucosa para lactosa.
Glucagón	Páncreas (células α)	Aumenta glicemia en ayuno; activa la liberación de glucosa hepática.	Estimula directamente la gluconeogénesis hepática.	Mantiene la disponibilidad de glucosa para sostener la síntesis de lactosa, especialmente en ayuno o déficit energético.
Cortisol	Corteza adrenal	Respuesta al estrés; activa vías catabólicas.	Activa enzimas gluconeogénicas y potencia la acción del glucagón.	En lactancias intensas ayuda a sostener la gluconeogénesis, pero niveles elevados

				prolongados afectan la salud y eficiencia productiva.
Hormona del crecimiento (GH)	Adenohipófisis	Incrementa uso de ácidos grasos y preserva glucosa.	Reduce uso periférico de glucosa, facilitando su redirección hacia la gluconeogénesis y órganos dependientes.	Fundamental para producción láctea: prioriza glucosa para la síntesis de lactosa y estimula la partición de nutrientes hacia la glándula mamaria.

2. Particularidades del Metabolismo Energético en Cabras en Sistemas Extensivos

2.1 Necesidades Energéticas Durante la Lactancia

Durante la lactancia, las necesidades energéticas de la cabra se incrementan de forma considerable debido a la alta demanda de glucosa para la síntesis de lactosa, principal osmótico de la leche. En sistemas extensivos, donde el acceso a forraje de calidad puede ser limitado, estas necesidades rara vez se cubren en su totalidad. Se estima que una cabra lactante requiere entre 4882 y 5224 kJ/kg de leche corregida por grasa (López et al., 2004). Si estas demandas no se satisfacen, se puede presentar un balance energético negativo que afecta la producción de leche y la reproducción (Ben Salem y Smith, 2008).

La razón por la cual se necesita un aporte extra de energía radica en que durante la lactancia las cabras priorizan la síntesis de leche sobre otros procesos metabólicos, utilizando gran parte de su glucosa sanguínea para mantener la secreción láctea. Si el consumo de energía no es suficiente, los animales movilizan reservas corporales de grasa y proteína, lo que provoca pérdida de peso, cetosis

subclínica y disminución del rendimiento reproductivo. Por ello, la suplementación con fuentes energéticas o precursores gluconeogénicos permite mantener un flujo constante de glucosa hepática, evitando el deterioro del estado corporal y prolongando la persistencia de la lactancia (McArt et al., 2020; Dong et al., 2023).

2.2 Balance energético negativo en cabras lactantes

El balance energético negativo (BEN) se presenta cuando la energía metabolizable consumida por la cabra es insuficiente para cubrir los requerimientos de mantenimiento, locomoción y producción de leche. En cabras lactantes, especialmente durante las primeras semanas posparto, la demanda energética aumenta rápidamente debido al establecimiento del pico de lactancia, lo que provoca que la ingesta voluntaria no alcance a compensar la salida energética a través de la leche (NRC, 2007).

En sistemas extensivos, como los predominantes en regiones áridas y semiáridas del norte de México, este fenómeno es aún más marcado. La disponibilidad de forraje es estacional y suele presentar baja calidad, con niveles reducidos de energía metabolizable y fibra efectiva, lo que limita la digestión y la capacidad de consumo. Además, el pastoreo prolongado incrementa el gasto energético por actividad física, profundizando el BEN (Sanz Sampelayo et al., 2007).

Ante un BEN, el organismo moviliza reservas corporales, principalmente tejido adiposo. Este proceso incrementa las concentraciones plasmáticas de Ácidos Grasos No Esterificados (AGNES), que llegan al hígado donde son utilizados para oxidación o convertidos en cuerpos cetónicos como β -hidroxibutirato (BHBA).

Niveles elevados de AGNES y BHBA son biomarcadores de estrés metabólico y se relacionan con cetosis subclínica, disminución de la producción láctea y afectación del desempeño reproductivo (Ben Salem y Smith, 2008; Chilliard et al., 1998). Paralelamente, la pérdida de condición corporal compromete la función inmune, aumentando la susceptibilidad a enfermedades metabólicas e infecciosas.

Varios estudios han mostrado que la suplementación energética estratégica es clave para mitigar los efectos del BEN. El uso de precursores gluconeogénicos como propionato de calcio, propilenglicol o sales de propionato incrementa la disponibilidad de sustratos para la gluconeogénesis hepática, elevando la glucemia y reduciendo la producción de cuerpos cetónicos. Esto mejora el estado energético, acelera la recuperación de la condición corporal y favorece la persistencia de la lactancia (McArt et al., 2020; Dong et al., 2023). Asimismo, la mejora en el metabolismo energético posparto se traduce en un retorno más rápido al estro y mejor fertilidad, lo que incrementa la eficiencia productiva del rebaño (Chilliard et al., 1998).

3. Fuentes de Precursores Gluconeogénicos en Sistemas Extensivos

Los tres precursores gluconeogénicos más comunes en la alimentación de rumiantes son el propionato, el glicerol y el lactato, utilizados en diversas formas de suplementación para sostener la gluconeogénesis durante la lactancia o la gestación avanzada (Sanz Sampelayo et al., 2007) .

El glicerol se obtiene principalmente como subproducto del proceso de fabricación de biodiésel a partir de aceites vegetales o grasas animales. En el organismo,

también puede provenir de la movilización de triglicéridos corporales durante periodos de deficiencia energética, convirtiéndose en una fuente importante de carbono para la síntesis de glucosa hepática (Sanz Sampelayo et al., 2007).

El lactato, por otro lado, es un producto del metabolismo anaerobio del músculo esquelético y también puede generarse en el rumen por fermentación de carbohidratos. Este compuesto es transportado al hígado, donde se convierte en glucosa mediante el ciclo de Cori, contribuyendo al mantenimiento de la glicemia y a la producción de energía para la glándula mamaria (van der Drift et al., 2012).

Las cabras en pastoreo extensivo consumen una gran diversidad de especies vegetales nativas, muchas de las cuales aportan carbohidratos estructurales y no estructurales que tras la fermentación ruminal se convierten en AGVs. Las especies del género *Prosopis*, *Acacia* y *Atriplex* son comunes en zonas áridas y han demostrado ser ricas en fibras fermentables que favorecen la producción de propionato (Corona et al., 2005). La variabilidad estacional afecta la disponibilidad de estos recursos, por lo que la suplementación estratégica con concentrados es una herramienta útil para mantener la homeostasis energética (Morand-Fehr, 2005).

4. Rol del Propionato y Propanodiol

El propionato es considerado el ácido graso volátil gluconeogénico más importante en los rumiantes, ya que aporta entre el cincuenta y el setenta por ciento de la glucosa que se produce en el hígado durante la lactancia.

Este compuesto se genera principalmente a partir de la fermentación de almidones y azúcares solubles por bacterias ruminales como *Prevotella spp.*, *Selenomonas*

ruminantium y *Veillonella spp.*, y posteriormente es absorbido a través de la pared ruminal y transportado por la vena porta hacia el hígado, donde ingresa en la vía metabólica que lo convierte en succinil-CoA y finalmente en glucosa mediante la gluconeogénesis, tal como describen Aschenbach et al. (2010).

En los sistemas extensivos, donde la dieta se basa en forrajes maduros con baja concentración de carbohidratos fermentables, la producción de propionato disminuye de forma significativa, lo que contribuye de manera directa al establecimiento del balance energético negativo en cabras durante la lactancia temprana, debido a la insuficiente disponibilidad de energía glucogénica para cubrir los requerimientos de mantenimiento y producción de leche (Van der Drift et al., 2012).

El 1,2-propanodiol o propanodiol ha adquirido relevancia como un precursor gluconeogénico alternativo con un comportamiento metabólico flexible, ya que puede ser fermentado parcial o totalmente por microorganismos ruminales como Megasphaera elsdenii para generar propionato o puede absorberse de forma directa a través de la pared gastrointestinal y ser transformado en el hígado en lactato, piruvato y posteriormente glucosa. Esta doble capacidad metabólica permite que el propanodiol actúe como un sustrato eficaz para sostener la gluconeogénesis, especialmente en condiciones de incremento en la demanda energética como ocurre en cabras y vacas lecheras durante la lactancia, etapa en la que se ha reportado que su suplementación reduce la severidad del balance energético negativo, disminuye las concentraciones de β -hidroxibutirato y ácidos grasos no

esterificados y reduce la incidencia de cetosis subclínica, de acuerdo con McArt et al. (2020).

Investigaciones recientes, como las de Dong et al. (2023), han demostrado que la combinación de propionato y propanodiol genera un suministro prolongado y estable de precursores gluconeogénicos, lo que favorece un funcionamiento hepático más eficiente, mantiene concentraciones más constantes de glucosa plasmática y reduce la movilización excesiva de tejido adiposo, lo cual resulta benéfico para animales en pastoreo extensivo con dietas limitadas en energía.

En este contexto, el propionato y el propanodiol pueden considerarse herramientas metabólicas clave para mejorar el estado energético de los rumiantes, optimizar la producción de leche y disminuir los trastornos metabólicos asociados al periodo de lactancia temprana, especialmente en sistemas extensivos donde la disponibilidad de nutrientes fermentables y la calidad del forraje imponen restricciones severas en el aporte natural de sustratos gluconeogénicos (Dong et al. (2023).

Capítulo III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El sistema extensivo de producción caprina fue desarrollado en el Ejido Nuevo León, ubicado en el municipio de Francisco I. Madero , Coahuila, dentro de la región conocida como Comarca Lagunera. Esta zona se caracteriza por presentar un clima árido, con una temperatura media anual superior a los 20 °C y una marcada escasez de precipitaciones. La precipitación pluvial promedio anual es de aproximadamente

250 mm, distribuida de forma irregular a lo largo del año (CONAGUA, 2020). Las coordenadas geográficas de la zona experimental son 25°32' latitud norte y 103°14' longitud oeste.

3.2. Experimento

Se utilizaron 30 cabras multirraciales, con un promedio de días en leche de 36 ± 2 días, peso promedio de 55 ± 2.5 kg y 2 ± 0.5 puntos de condición corporal. Previo al estudio los animales fueron desparasitados con ivermectina al 1% (Iverfull®) a dosis de 1 ml/50 kg de peso vivo. El primer grupo se denominó control (n=10), el segundo grupo fue T3 (n=10), se le adicionaron 3 gr de precursor gluconeogénico (propionato de calcio) y el tercer grupo T5 (n=10), con 5 gr del mismo precursor. El consumo de agua fue a libre acceso.

El precursor gluconeogénico utilizado fue propionato de calcio en presentación comercial en polvo. La suplementación se administró individualmente una vez al día, mezclada con el alimento ofrecido durante el ordeño matutino, asegurando el consumo total de la dosis por cada animal. Los tratamientos consistieron en: grupo control sin suplementación (GT0), grupo suplementado con 3 g de propionato de calcio por animal por día (GT3) y grupo suplementado con 5 g de propionato de calcio por animal por día (GT5). La suplementación se mantuvo durante 42 días consecutivos del periodo experimental.

Las dosis utilizadas fueron seleccionadas con base en estudios previos relacionados con el uso de precursores gluconeogénicos en rumiantes lactantes, con el objetivo de evaluar su efecto sobre el metabolismo energético y la producción de leche bajo condiciones extensivas.

3.2.1. Recolección de muestras

Se midió la producción de leche de las cabras semanalmente durante 42 días (7 muestreos) y se tomó una muestra de leche en un vial (50 ml) para analizar su calidad con el equipo Milkoscan Foss®.

Se analizó la serie leucocitaria y eritroide, las concentraciones de colesterol y triglicéridos, glucosa, proteína total y electrolitos sanguíneos. Las muestras fueron obtenidas con un intervalo de 15 días.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos de producción y composición de leche fueron analizados mediante un diseño completamente al azar con medidas repetidas en el tiempo, utilizando el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). El modelo incluyó el efecto fijo del tratamiento (0, 3 y 5 g de propionato de calcio), el efecto del tiempo de muestreo y la interacción tratamiento $\times$ tiempo. Las variables analizadas fueron producción de leche, contenido de grasa, proteína, lactosa, sólidos totales y sólidos no grasos. Para todas las variables se consideró un nivel de significancia de $P < 0.05$.

RESULTADOS

Producción de leche (L/día)

La producción en el grupo control (GT0) se mantuvo estable entre 1.61 y 1.75 L/día. El grupo con 3 g de suplemento (GT3) presentó un ligero incremento, alcanzando un máximo de 1.84 L/día en la cuarta semana. El grupo con 5 g (GT5) mostró valores variables, sin superar consistentemente al control. Esto indica que la suplementación tuvo un efecto limitado, con una tendencia positiva únicamente en GT3.

No se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en la producción diaria de leche ($P > 0.05$); sin embargo, el grupo GT3 presentó una tendencia numérica superior respecto al grupo control durante la cuarta semana de evaluación.

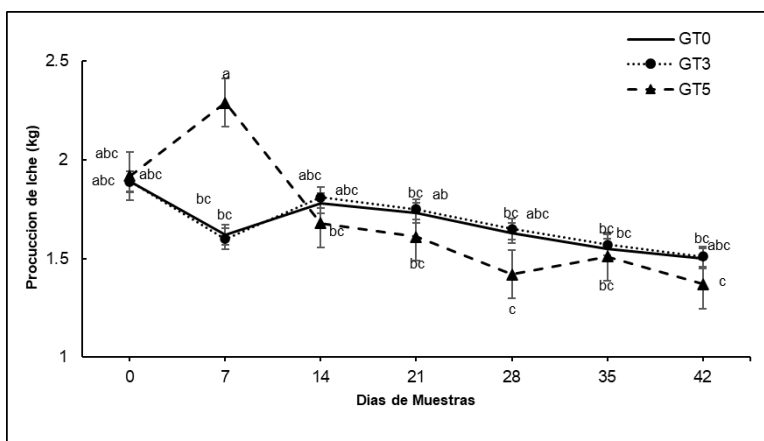


Figura 1 Producción diaria de leche (L/día) en cabras suplementadas con propionato de calcio.

Contenido de grasa en leche (%)

El grupo control (GT0) presentó valores entre 2.4 y 3.2 %, con una caída marcada en la semana 28. El grupo con 3 g (GT3) mostró valores más estables y superiores en promedio al control, alcanzando hasta 3.65 %. El grupo con 5 g (GT5) presentó gran variabilidad, con picos de hasta 4.08 % pero también caídas pronunciadas. Esto sugiere que 3 g favorece la estabilidad, mientras que 5 g genera oscilaciones.

El contenido de grasa en leche mostró variaciones numéricas entre tratamientos, aunque sin diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$).

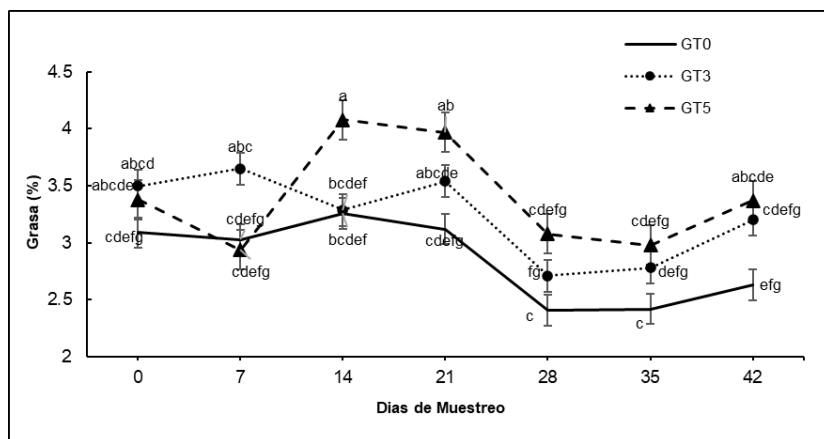


Figura 2 Contenido de grasa en leche (%) durante el periodo experimental.

Proteína en leche (%)

Los tres grupos se mantuvieron relativamente estables, con valores cercanos a 3.0–3.3 %. El control (GT0) osciló alrededor de 3.1 %, mientras que GT3 y GT5 alcanzaron valores ligeramente más altos (hasta 3.32 %). Esto indica que la suplementación no modificó de manera marcada la proteína, aunque sí hubo una ligera tendencia positiva en GT3 y GT5.

La concentración de proteína permaneció estable entre grupos experimentales durante el periodo de estudio ($P > 0.05$).

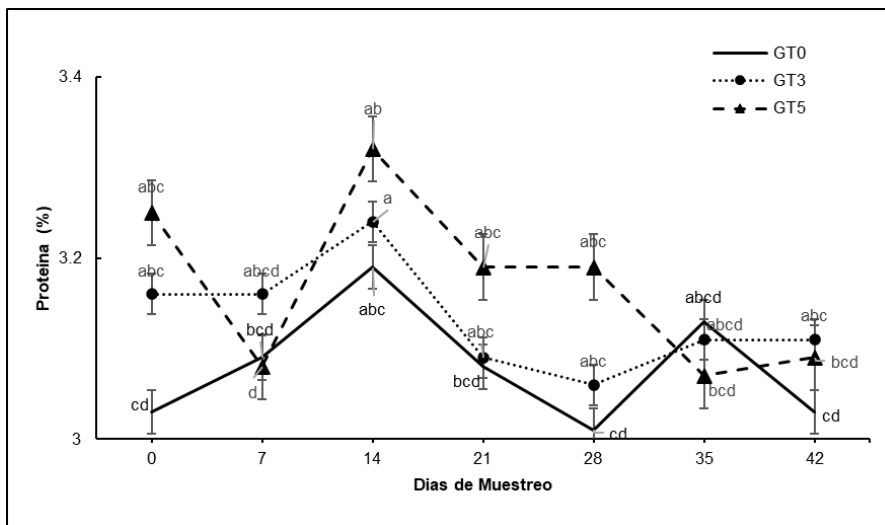


Figura 3 Concentración de proteína en leche (%).

Lactosa en leche (%)

Los valores de lactosa se mantuvieron estables en los tres grupos, con rangos de 4.2 a 4.6 %. El grupo con 3 g (GT3) mostró mayor constancia a lo largo del tiempo, mientras que GT5 presentó una ligera reducción y variabilidad en comparación con el control. Esto sugiere que 3 g ayuda a mantener niveles más regulares de lactosa.

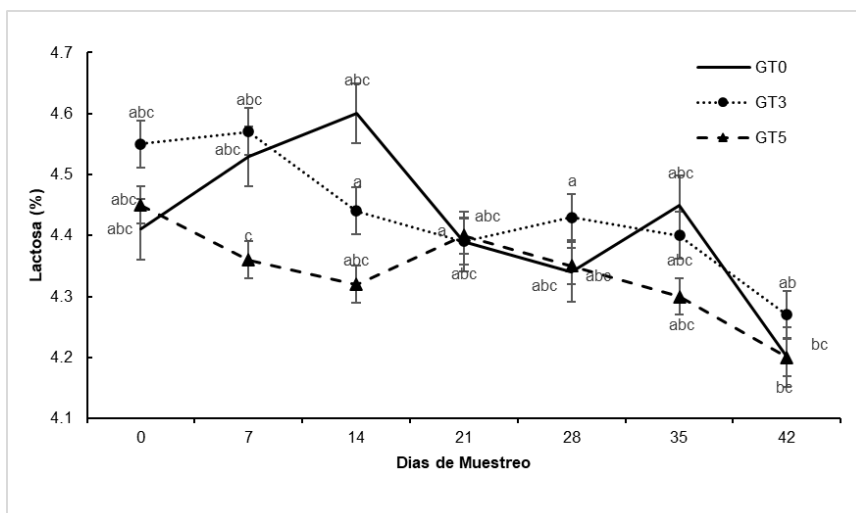


Figura 4 Porcentaje de lactosa en leche (%).

Sólidos totales (%)

El grupo control (GT0) y GT3 mantuvieron valores estables entre 10.2 y 11.8 %. En cambio, el grupo con 5 g (GT5) mostró variaciones más amplias, alcanzando picos de hasta 12.38 % en la semana 14, pero también descensos posteriores. Esto indica que la dosis alta puede elevar los sólidos totales, aunque sin consistencia.

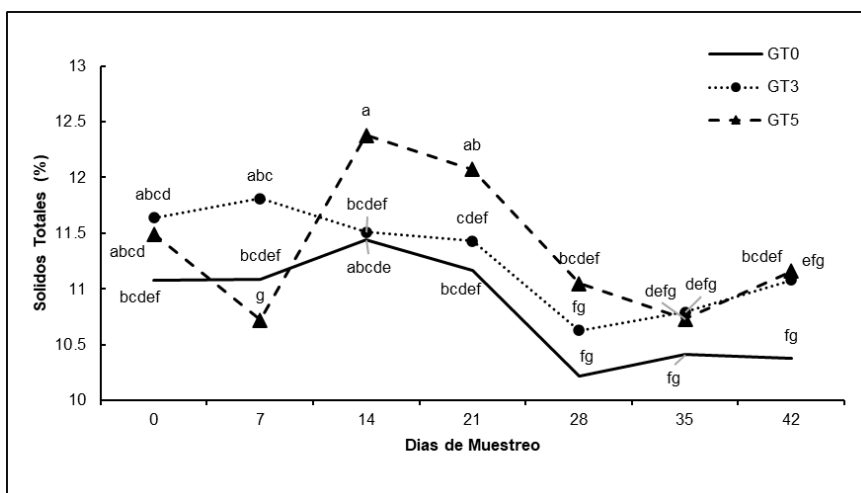


Figura 5 Contenido de sólidos totales (%) en leche

Sólidos no grasos (%)

El grupo control (GT0) mantuvo valores estables (7.7–8.2 %). El grupo con 3 g (GT3) presentó una ligera caída en la semana 14, mientras que GT5 mostró valores similares al control, aunque ligeramente inferiores en promedio. En general, no se observaron efectos claros de la suplementación sobre los sólidos no grasos.

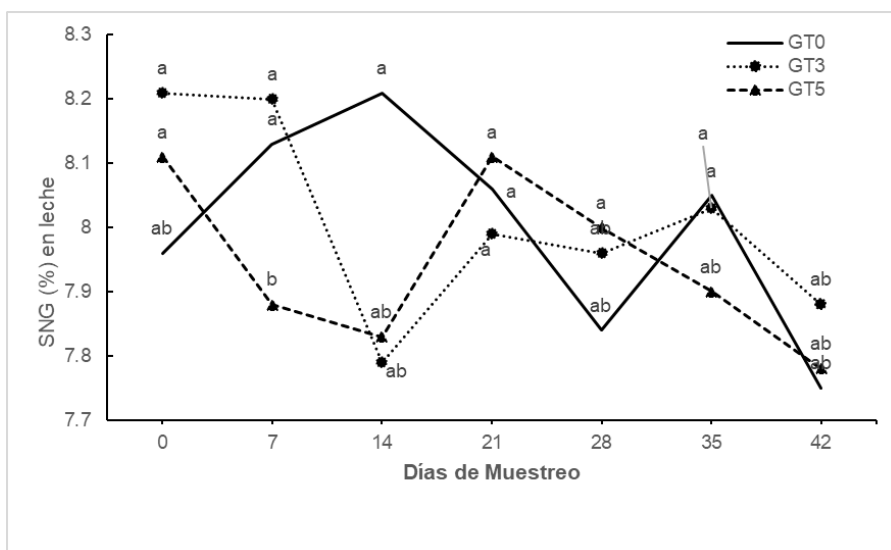


Figura 6 Sólidos no grasos (%) en leche.

Capítulo IV

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que la suplementación con propionato de calcio tuvo un efecto moderado sobre la producción y composición de la leche en cabras lecheras manejadas bajo sistema extensivo. Aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($P > 0.05$), el grupo suplementado con 3 g diarios (GT3) mostró una tendencia productiva más estable respecto al grupo control y al grupo con mayor dosis.

Desde el punto de vista fisiológico, estos resultados pueden explicarse por el papel del propionato como principal precursor gluconeogénico en rumiantes. Una vez absorbido a nivel ruminal, el propionato es transportado al hígado, donde participa en la síntesis de glucosa mediante la vía gluconeogénica. Este mecanismo adquiere especial importancia durante la lactancia, etapa en la cual la demanda de glucosa aumenta considerablemente debido a la síntesis de lactosa en la glándula mamaria. Por ello, una suplementación moderada podría contribuir a mantener un balance energético más estable y reducir parcialmente la movilización excesiva de reservas corporales.

La mayor estabilidad observada en GT3 sugiere que dosis moderadas de propionato de calcio podrían favorecer la eficiencia metabólica sin alterar significativamente la fermentación ruminal. En contraste, el grupo GT5 presentó una mayor variabilidad en algunos componentes lácteos, lo cual podría relacionarse con diferencias

individuales en el aprovechamiento metabólico del suplemento o posibles alteraciones en la dinámica fermentativa ruminal cuando la dosis aumenta.

Los resultados obtenidos coinciden parcialmente con lo reportado por Dong et al. (2023), quienes observaron mejoras en el metabolismo energético y estabilidad glucémica en rumiantes suplementados con precursores gluconeogénicos. Sin embargo, en el presente estudio las respuestas productivas fueron menos marcadas, posiblemente debido a las condiciones propias del sistema extensivo, donde la calidad y disponibilidad del forraje varían constantemente y limitan el aporte energético total de la dieta.

Asimismo, la ausencia de diferencias estadísticas significativas puede atribuirse al número reducido de animales por tratamiento, a la variabilidad fisiológica individual y a la duración relativamente corta del periodo experimental. En sistemas extensivos, factores ambientales como temperatura, distancia recorrida durante el pastoreo y disponibilidad estacional de forraje también pueden influir considerablemente sobre la respuesta metabólica de los animales.

En conjunto, los resultados sugieren que la suplementación moderada con propionato de calcio puede contribuir a mantener la estabilidad metabólica y productiva de cabras lecheras bajo condiciones extensivas, aunque se requieren estudios con mayor duración, mayor número de animales y evaluaciones metabólicas más específicas para confirmar plenamente sus efectos sobre el balance energético y la eficiencia productiva.

Capítulo V

CONCLUSIONES

La suplementación con 3 g de propionato de calcio mostró una mayor estabilidad en la producción y composición de la leche en comparación con el grupo control y el tratamiento con 5 g, lo que sugiere un posible efecto favorable sobre el metabolismo energético de las cabras lactantes bajo sistema extensivo.

Aunque no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, los animales suplementados mantuvieron parámetros productivos y metabólicos dentro de rangos fisiológicos normales durante el periodo experimental.

El tratamiento con 5 g presentó una mayor variabilidad en algunos componentes de la leche, lo que indica que una suplementación elevada no necesariamente mejora la respuesta productiva de los animales.

Los resultados obtenidos sugieren que la suplementación moderada con propionato de calcio puede representar una alternativa nutricional útil para apoyar el estado energético de cabras lecheras manejadas en condiciones extensivas y de limitada disponibilidad forrajera.

Se recomienda realizar estudios con un mayor número de animales y un periodo experimental más amplio para confirmar los efectos observados y evaluar con mayor precisión la respuesta metabólica y productiva de las cabras suplementadas.

LITERATURA CITADA

Aschenbach, J. R., Kristensen, N. B., Donkin, S. S., Hammon, H. M., y Penner, G. B. (2010). Gluconeogenesis in dairy cows: The secret of making sweet milk from sour dough. *Nutrients*, 2(4), 383–399. <https://doi.org/10.3390/nu2040383>

Baird, G. D., y Heitzman, R. J. (1970). Gluconeogenesis in the cow. The effects of a glucocorticoid on hepatic intermediary metabolism. *Biochemical Journal*, 116(5), 865–874. <https://doi.org/10.1042/bj1160865>

Baird, G. D., y Young, J. L. (1975). The response of key gluconeogenic enzymes in bovine liver to various dietary and hormonal regimes. *The Journal of Agricultural Science*, 84(2), 227–230. <https://doi.org/10.1017/S0021859600052321>

Bauman, D. E., y Griinari, J. M. (2003). Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Annual Review of Nutrition*, 23(1), 203–227. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073408>

Ben Salem, H., y Smith, T. (2008). Feeding strategies to increase small ruminant production in dry environments. *Small Ruminant Research*, 77(2–3), 174–194. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.03.008>

Corona, L., Mendoza, G. D., Castrejón, F. A., y Barcena, R. (2005). Effect of concentrate level and yeast culture on ruminal fermentation and microbial protein synthesis in lambs. *Livestock Science*, 96(2–3), 201–208.

Dong, Y., Ma, W., Zhang, L., Gao, X., Ma, C., Zhang, X., ... y Xu, G. (2023). Propionate regulates hepatic gluconeogenesis in ruminants via gene expression of rate-limiting enzymes. *Genes*, 14(2), 431. <https://doi.org/10.3390/genes14020431>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). [Título del informe o base de datos]. <https://www.inegi.org.mx>

Kristensen, N. B., y Harmon, D. L. (2004). Splanchnic metabolism of short-chain fatty acids in ruminants. *Journal of Animal Science*, 82(E-Suppl), E195–E204. https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE195x

Lomax, M. A., y Baird, G. D. (1983). Blood flow and nutrient exchange across the liver and gut of the dairy cow. Effects of lactation and fasting. *British Journal of Nutrition*, 49(3), 481–496. <https://doi.org/10.1079/BJN19830057>

López, A., Horta, J., y Torres, M. (2004). Metabolizable energy requirements of lactating goats. *Livestock Production Science*, 88(2), 165–172.

McArt, J. A. A., Neves, R. C., y Nydam, D. V. (2020). Epidemiology of subclinical ketosis in dairy cattle: Prevalence and risk factors. *Veterinary Journal*, 264, 105456. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2020.105456>

Mellado, M., Rodríguez, I. J., Alvarado-Espino, A., Véliz, F. G., Mellado, J., y García, J. E. (2020). Short communication: reproductive response to concentrate supplementation of mixed-breed goats on rangeland. *Tropical Animal Health and Production*, 52(5), 2737–2741. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02264-z>

Morand-Fehr, P. (2005). Recent developments in goat nutrition and application: A review. *Small Ruminant Research*, 60(1–2), 25–43.

<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.06.023>

Noro, M., y Wittwer, F. (2012). Interrelaciones entre ureagénesis y gluconeogénesis hepática en rumiantes alimentados con elevado contenido de nitrógeno. *Veterinaria México OA*, 43(2), 143–154.

<https://repositorio.unam.mx/contenidos/4119642>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>

van der Drift, S. G. A., Jorritsma, R., Schonewille, J. T., Knijn, H. M., y Stegeman, J. A. (2012). The pathway of hepatic glucose production with propylene glycol in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 95(10), 5766–5776.

<https://doi.org/10.3168/jds.2011-5211>

Zhang, Q. (2011). *Regulation of gluconeogenesis in dairy cattle* (Doctoral dissertation, Purdue University).

https://docs.lib.purdue.edu/open_access_dissertations/1601

Zhang, Q., Koser, S. L., Bequette, B. J., y Donkin, S. S. (2015). Effect of propionate on mRNA expression of key genes for gluconeogenesis in liver of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 98(12), 8698–8709.

<https://doi.org/10.3168/jds.2015-9590>

Zhang, Q., Koser, S. L., Bequette, B. J., y Donkin, S. S. (2016). Propionate induces mRNA expression of gluconeogenic genes in bovine calf hepatocytes.

Journal of Dairy Science, 99(5), 3908–3915. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10312>

Ben Salem, H., & Smith, T. (2008). Feeding strategies to increase small ruminant production in dry environments. *Small Ruminant Research*, 77(2–3), 174–194.

Chilliard, Y., Bocquier, F., & Doreau, M. (1998). Digestive and metabolic adaptations of ruminants to undernutrition and consequences on reproduction. *Reproduction Nutrition Development*, 38(2), 131–152.

Dong, L., Zhou, Z., Li, S., & Wang, J. (2023). Effects of calcium propionate supplementation on energy metabolism, glucose precursors, and performance in lactating dairy goats. *Journal of Dairy Science*, 106(5), 3512–3525.

McArt, J. A. A., Neves, R. C., & Ospina, P. A. (2020). The transition period in dairy cows: Metabolic challenges and management strategies. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 36(2), 321–336.

National Research Council. (2007). *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*. National Academies Press.

Sanz Sampelayo, M. R., Pérez, L., Martín Alonso, J. J., & Boza, J. (2007). Extensive vs. intensive goat feeding systems and metabolic effects. *Small Ruminant Research*, 68, 258–264.