



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

LICENCIATURA EN MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

TESIS

PERSISTENCIA DE ÁCIDOS GRASOS EN LA LECHE DE VACAS HOLSTEIN ALIMENTADAS CON SEMILLA DE LINAZA MOLIDA

Para obtener el título de

Médica Veterinaria Zootecnista

PRESENTA

Andrea Díaz Xelhuantzi

Director

Dr. Rodolfo Vieyra Alberto

Codirector

Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández

Comité tutorial

Dr. Jorge Luis Mejía Méndez

Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez

Dr. Jesús Armando Salinas Martínez

Santiago Tulantepec de Lugo, Hgo., México, febrero de 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Academic Area of Veterinary Medicine and Zootecnia

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 09 de febrero de 2026

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la egresada de la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia, **Andrea Díaz Xelhuantzi**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"PERSISTENCIA DE ÁCIDOS GRASOS EN LA LECHE DE VACAS HOLSTEIN ALIMENTADAS CON SEMILLA DE LINAZA MOLIDA"**, que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, atendidas las correcciones que fueron acordadas.

Firma de conformidad de los miembros del comité de tesis:

DIRECTOR	Dr. Rodolfo Vieyra Alberto
CODIRECTOR	Dr. Juan Carlos Ángeles Hernández
ASESOR	Dr. Jorge Luis Mejía Méndez
ASESOR	Dr. Jesús Armando Salinas Martínez
ASESOR	Dr. Alfonso Longinos Muñoz Benítez

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dra. Maricela Ayala Martínez
Coordinadora de Medicina
Veterinaria y Zootecnia

Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775.
Teléfono: 7717172001 Ext. 42105
mvzjefatura@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mis padres por su amor incondicional, por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la perseverancia son la base de todo logro. Gracias por cada sacrificio, palabra de aliento y por creer en mi incluso cuando yo dudaba.

A mi hermano que ha estado presente en cada etapa de mi vida siempre dándome apoyo y comprensión en los mejores momentos y también en los momentos más difíciles, por ser mi guía, mi ejemplo y una de mis mayores fortalezas.

A mi familia Hernández Estrada que me enseñó que los lazos verdaderos no siempre se forjan con sangre sino con amor y comprensión.

Gracias a todos por acompañarme con cariño y paciencia a lo largo de este camino, ustedes son mi razón para seguir adelante y este logro también les pertenece porque en cada página de esta tesis hay un poco de su fuerza, de sus consejos y de su fé en mi.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ciencias Agropecuarias a través del Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia por la formación académica y por ser un espacio que fomentó mi crecimiento personal y profesional.

A una Unidad de Producción Lechera Comercial ubicada en el municipio de Cuautepéc de Hinojosa, Hidalgo, México, por las facilidades proporcionadas para el uso responsable de los animales y manipulación de la dieta.

A mi Director de tesis, por su orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de este trabajo, por compartir su conocimiento y experiencia. Su guía y consejos fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mi codirector de tesis por su acompañamiento constante, su disposición para orientar este trabajo y por su tiempo dedicado a la revisión y mejora del mismo. Sus observaciones y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	1
ÍNDICE DE CUADROS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
I. INTRODUCCIÓN	8
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1. La leche y sus componentes	10
2.2. Perfil lipídico en la leche de vaca	18
2.3. Síntesis de ácidos grasos.....	25
2.4. Ácido linoleico conjugado (CLA).....	28
2.5. La linaza y sus efectos en la calidad nutritiva de la leche	28
III. JUSTIFICACIÓN	32
IV. HIPÓTESIS	33
V. OBJETIVOS	34
5.1. Objetivo general	34
5.2. Objetivos específicos.....	34
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	35
6.1. Localización	35
6.2. Características de los animales.....	35
6.3. Desarrollo experimental.....	35
6.4. Análisis de laboratorio	36
6.5. Análisis estadístico	36

VII. RESULTADOS.....	38
VIII. DISCUSIÓN	47
IX. CONCLUSIÓN	49
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
XI. ANEXOS	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de la leche en diferentes especies	10
Cuadro 2. Porcentaje de algunos aminoácidos encontrados en la leche de vaca.....	14
Cuadro 3. Composición porcentual de la leche de diferentes tipos raciales de bovino	18
Cuadro 4. Nombre común y nomenclatura química de principales ácidos grasos presentes en la leche de vaca	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un fosfolípido y su organización en una bicapa.....	12
Figura 2. Esquema de las principales proteínas que se encuentran en la leche de vacas	16
Figura 3. Esquema de la síntesis de lactosa en la glándula mamaria	17
Figura 4. Proporción de ácidos grasos en la leche de vaca debido a su insaturación.....	19
Figura 5. Clasificación de los ácidos grasos con énfasis en la nomenclatura omega	20
Figura 6. Representación esquemática de un ácido graso <i>cis</i> y uno <i>trans</i>	22
Figura 7. Proceso de lipólisis y biohidrogenación en rumiantes	26
Figura 8. Contenido del ácido graso butírico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	38
Figura 9. Contenido del ácido graso caproico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	38
Figura 10. Contenido del ácido graso caprílico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	39
Figura 11. Contenido del ácido graso cáprico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	39
Figura 12. Contenido del ácido graso undecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	40
Figura 13. Contenido del ácido graso láurico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	40
Figura 14. Contenido del ácido graso tridecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	41
Figura 15. Contenido del ácido graso mirístico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	41
Figura 16. Contenido del ácido graso miristoleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	42
Figura 17. Contenido del ácido graso pentadecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	42
Figura 18. Contenido del ácido graso palmítico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	43

Figura 19. Contenido del ácido graso heptadecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	43
Figura 20. Contenido del ácido graso esteárico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	44
Figura 21. Contenido del ácido graso vaccénico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	44
Figura 22. Contenido del ácido graso oleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	45
Figura 23. Contenido del ácido graso linoleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	45
Figura 24. Contenido del ácido graso linolénico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	46
Figura 25. Contenido del ácido linoleico conjugado (CLA) en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida.	46

RESUMEN

La leche de vaca es un producto que aporta gran cantidad de componentes nutricionales al humano. El objetivo de esta investigación fue evaluar la persistencia y el perfil de ácidos grasos en leche de vacas en estabulación con la inclusión del 3% de semilla de linaza molida en la dieta. Se utilizaron 12 vacas primíparas Holstein, en el segundo tercio de lactación con un peso de 543 ± 77 kg y una producción promedio de leche de 30.6 litros al día. Las vacas fueron asignadas al azar en un diseño de bloques completamente al azar con días de medición (0 d, 5 d, 10 d, 15 d, 20 d, 25 d, 30 d, 35 d, 40 d y 45 d). Los tratamientos fueron: 1) Testigo: Dieta completamente mezclada, 2) Linaza: Dieta completa mezclada con la inclusión de 3 % de linaza molida sobre la materia seca. Los datos obtenidos se analizaron con el modelo mixto $Y_{ijk} = \mu + A_i + T_j + D_k + (T*D)_{jk} + \epsilon_{ijkl}$ del programa estadístico SAS (2002). Se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de medias ($p < 0.05$). Se observaron diferencias ($p < 0.05$) en el aumento de los ácidos grasos insaturados ácido linoleico conjugado (CLA) (día 15 y 20) y oleico (día 15 y 25) y disminuyeron los ácidos grasos saturados, principalmente el palmítico, lo que indica que la respuesta de la linaza es dinámica y depende del momento de la suplementación. En conclusión, incluir 3 % de semilla de linaza molida en la dieta de vacas primíparas en estabulación mejora el perfil lipídico de la leche a partir del día 15 de suplementación; sin embargo, al suspender la semilla de linaza existe una gran variabilidad en la concentración de los ácidos grasos en la leche.

ABSTRACT

Cow's milk provides a large number of nutritional components to humans. The objective of this research was to evaluate the persistence and fatty acid profile in the milk of housed cows with the inclusion of 3% ground flaxseed in their diet. Twelve primiparous Holstein cows in their second trimester of lactation, weighing 543 ± 77 kg and with an average milk production of 30.6 liters per day, were used. The cows were randomly assigned in a completely randomized block design with measurement days (0 d, 5 d, 10 d, 15 d, 20 d, 25 d, 30 d, 35 d, 40 d, and 45 d). The treatments were 1) Control: Completely mixed diet, 2) Flaxseed: Complete mixed diet with the inclusion of 3% ground flaxseed on a dry matter basis. The data obtained were analyzed using the mixed model $Y_{ijk} = \mu + A_i + T_j + D_k + (T \cdot D)_{jk} + \epsilon_{ijkl}$ from the SAS statistical program (2002). Tukey's test was used for mean comparisons ($p < 0.05$). Differences ($p < 0.05$) were observed in the increase of the unsaturated fatty acids conjugated linoleic acid (CLA) (days 15 and 20) and oleic acid (days 15 and 25), and a decrease in saturated fatty acids, mainly palmitic acid, indicating that the response to flaxseed is dynamic and depends on the timing of supplementation. In conclusion, including 3% ground flaxseed in the diet of housed primiparous cows improves the lipid profile of the milk from day 15 of supplementation; however, when flaxseed is discontinued, there is a great variability in the concentration of fatty acids in the milk.

I. INTRODUCCIÓN

La leche de vaca es una fuente importante de nutrientes para el ser humano, no solo durante la infancia si no a lo largo de la vida. Se vaca se conforma por una fracción líquida y una sólida, compuesta por proteína, lactosa, minerales y grasa. La fracción lipídica destaca por que, durante muchos años, se ha utilizado como un indicador de calidad debido a su funcionalidad en la elaboración de derivados, además de ser un gran aporte energético (Gómez et al., 2005).

El perfil lipídico de la leche es complejo, pues se han encontrado más de 400 tipos de ácidos grasos, lo que le confiere a la leche características únicas que influyen sobre la consistencia y calidad nutricional. Dentro de los ácidos grasos de mayor interés gracias a sus propiedades benéficas para la salud humana se encuentran los ácidos grasos vaccénico, oleico y el ácido linoléico conjugado (CLA), un grupo de isómeros del ácido linoleico formados principalmente por la actividad bacteriana en el rumen y por la enzima $\Delta 9$ desaturasa en glándula mamaria, que tienen propiedades hipocolesteromiantes, anticancerígenas, mejoran la respuesta inflamatoria y fortalecen el sistema inmune (Tian et al., 2022; Barca, 2016).

La linaza (*Linum usitatissimum*) es una semilla oleaginosa ampliamente utilizada en nutrición animal por su elevado contenido de lípidos principalmente de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), destacando el ácido alfa-linolénico (C18:3), precursor de los ácidos grasos ω -3 influyendo directamente sobre el perfil de ácidos grasos en la leche (Oomah, 2001). Además, aporta compuestos bioactivos como lignanos, fibra dietética y proteínas que pueden influir en diversos procesos metabólicos. En nutrición de rumiantes se ha estudiado la inclusión de fuentes lipídicas ricas en ácidos grasos insaturados como una estrategia para modificar el perfil lipídico con la finalidad de incrementar la proporción de ácidos grasos considerados benéficos para la salud humana (Chillard et al. (2007).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la persistencia y el perfil de ácidos grasos en leche de vacas en estabulación con la inclusión del 3% de semilla de linaza molida en la dieta.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La leche y sus componentes

La leche es el producto de la secreción normal de la glándula mamaria de animales bovinos sanos obtenida por uno o varios ordeños diarios, higiénicos, completos e ininterrumpidos. La leche desempeña un papel fundamental, forma parte de la dieta básica de las personas no solo al nacimiento, sino también a lo largo de las distintas etapas de la vida debido a su alto valor nutricional. Además, es utilizada para la obtención de subproductos como queso, yogur, mantequilla, crema, helado, entre otros (Gómez et al., 2005).

La leche es una mezcla compleja que consta de agua y sólidos totales o extracto seco que lo conforman la grasa, proteína, carbohidratos, vitaminas y minerales. Los sólidos totales varían por factores como el tipo racial, el tipo de alimentación, el medio ambiente, la etapa de la curva de lactancia, el estado sanitario de la hembra lactante, la hora del ordeño, entre otros (García et al., 2014).

Cuadro 1. Composición de la leche en diferentes especies

Nutriente	Mujer	Vaca	Búfala	Cabra	Oveja
Agua, %	87	88	84	88	80
Energía, Kcal / 100 g	7	61	97	70	100
Proteína, %	1.0	3.2	3.7 – 6.9	3.4	6.2
Grasa, %	4.4	3.4	7.9	3.9	7.6
Lactosa, %	6.9	4.7	5.2	4.5	3.7
Minerales, %	0.20	0.72	0.79	-	0.90

Modificado de Gómez Agudelo et al. (2005), Cámara Nacional de Industriales de la Leche (2011) y Bidot Fernández (2017)

2.1.1. Agua

El agua constituye el principal componente de la leche y cumple una función esencial, no solo al cubrir los requerimientos hídricos de los neonatos, sino también al actuar como disolvente de los componentes sólidos como proteínas, lípidos y minerales (Barca, 2016). Además, participa activamente en la regulación de diversas reacciones fisicoquímicas, entre ellas el pardeamiento de Maillard, la oxidación de lípidos, la actividad enzimática y el crecimiento microbiano, factores que pueden comprometer la estabilidad de la leche y sus subproductos (Goulding et al., 2020). La proporción de agua en la leche varía entre el 70 y 90.5 %, con un promedio de 87 % (Revilla, 1982). La presencia de agua tiene un impacto directo en el volumen total de leche producida. Este componente se incorpora a la leche a partir de la sangre que irriga a la glándula mamaria (Barca, 2016).

2.1.2. Grasa

Es considerado el componente más valioso de la leche (Tian et al., 2022). Los lípidos de la leche son complejos y se pueden clasificar desde el punto de vista alimenticio en triglicéridos o triacilglicéridos, fosfolípidos, glucolípidos y ésteres del colesterol (Martínez del Olmo, 2012).

La grasa constituye aproximadamente del 3 al 4 % de la leche (Tian et al., 2022) el cual podría manipularse con la alimentación principalmente (Gómez Agudelo et al., 2005). Existe una relación grasa láctea y proteína de la leche de 1.05 a 1.18 (García et al., 2022). La grasa se encuentra emulsionada o suspendida en glóbulos de 0.10 a 0.22 micrones de diámetro rodeados de una capa de fosfolípidos (Barca, 2016) que evitan que se aglutine y pueda separarse de la parte acuosa (Gómez Agudelo et al., 2005).

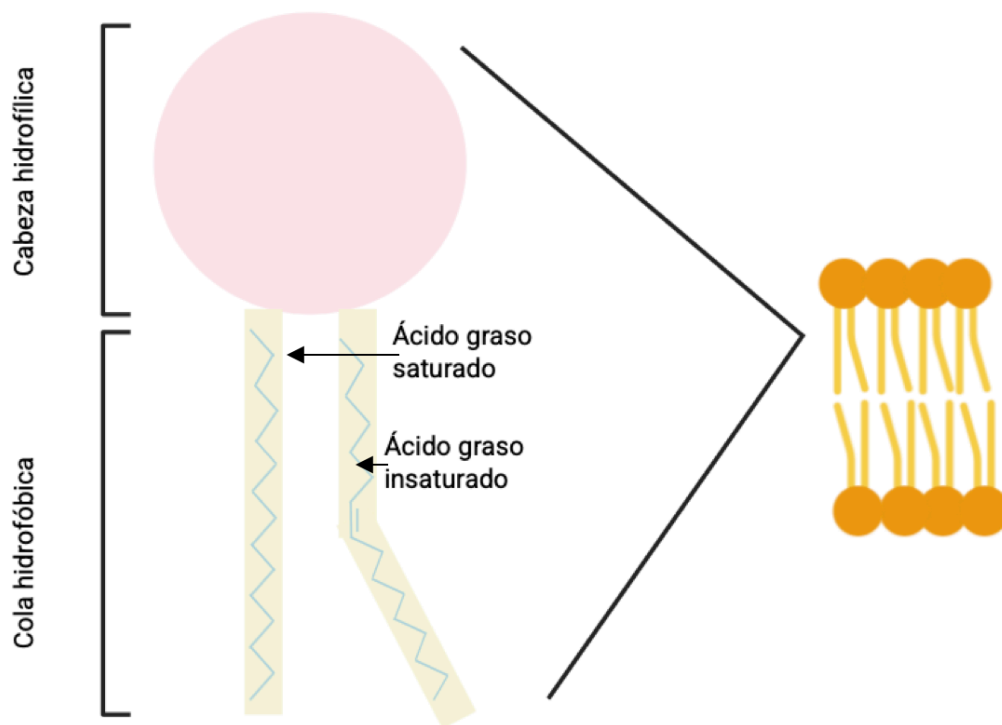


Figura 1. Estructura de un fosfolípido y su organización en una bicapa

Modificado de Kenelly et al. (2012)

La mayor parte de la grasa (95 – 98 %) está constituida por triglicéridos, el resto lo integran pequeñas cantidades de diacilglicerol, fosfolípidos y ácidos grasos libres como el CLA, la esfingomielina y el ácido graso butírico. Se ha identificado la presencia de más de 400 tipos de ácidos grasos en la grasa de la leche, convirtiéndola en el componente más complejo y mayoritario de la leche (Tian et al., 2022).

Aproximadamente, entre el 17 y 45 % de la grasa presente en la leche se sintetiza a partir del acetato, mientras que entre el 8 y 25 % se origina del butirato, ambos considerados metabolitos precursores clave en la síntesis de lípidos (Valenzuela, 2020; Vieyra, 2017).

El perfil lipídico de la leche depende del origen de los ácidos grasos. En su mayoría, los ácidos grasos de cadena larga provienen de la dieta o de reservas del tejido adiposo y los ácidos grasos de cadena corta y media generalmente son sintetizados en glándula mamaria a partir de precursores como el acetato y el beta-hidroxibutirato (Martínez et al., 2010; Tian et al., 2022). Los ácidos grasos aportados por la alimentación de los rumiantes influyen de manera considerable en la composición lipídica de los productos que derivan de ellos, lo que hace posible intervenir en la modificación del perfil de ácidos grasos presentes en la leche (Martínez et al., 2010).

Los ácidos grasos se clasifican por la longitud de su cadena de carbonos en cortos (hasta 6), medianos (8 a 16) y largos (18 o más), pero también pueden clasificarse en saturados o insaturados, si es que poseen un doble enlace (insaturados) o no (saturados) y dependiendo la cantidad de dobles enlaces podrían ser monoinsaturados (un solo doble enlace) o poliinsaturados (dos o más dobles enlaces) (Plata, 2023).

2.1.3. Proteína

La proteína se encuentra presente en la leche en un rango de 3 a 4 % (García et al., 2014) con un promedio del 3.5 %. Una mayor cantidad de grasa en leche se acompaña de una mayor cantidad de proteína en condiciones normales (Wattiaux, 2005).

Las proteínas se clasifican en dos grupos principales: caseínas (80 %) y proteínas séricas (20 %) (Gómez Agudelo et al., 2005). Las proteínas séricas son la β -lactoglobulina, α -lactoalbúmina, albúmina sérica e inmunoglobulinas (Valenzuela, 2020). Las caseínas se precipitan a pH de 4.6 a 20 °C, mientras que las proteínas séricas permanecen solubles en el suero de la leche (Valenzuela, 2020).

Las proteínas de la leche son sintetizadas en la ubre a partir de aminoácidos y péptidos que provienen de la sangre y su síntesis representa un gasto energético grande (García et al., 2014).

Cuadro 2. Porcentaje de algunos aminoácidos encontrados en la leche de vaca

Aminoácido	Caseína	Proteínas séricas
Ácido aspártico	7.1	10.5
/Asparagina		
Treonina	4.9	7.0
Serina	6.3	4.8
Ácido glutámico	22.4	17.6
/Glutamina		
Proteína	11.3	5.9
Glicina	2.7	1.8
Alanina	3.0	4.9
Cisteína	0.34	2.3
Metionina	2.8	1.7
Isoleucina	6.1	6.4
Valina	7.2	5.7
Leucina	9.2	10.3
Tirosina	6.3	2.9
Fenilalanina	5.0	3.1
Triptófano	1.7	2.4
Lisina	8.2	8.7
Histidina	3.1	1.7
Arginina	4.1	2.3

Modificado de Valenzuela (2020)

Caseína

Es una proteína característica de la leche porque no se encuentra en otros alimentos y es la proteína que se encuentra en mayor cantidad. Hay diferentes tipos de caseínas: α 1-caseína, α 2-caseína, β -caseína y κ -caseína; estas se encuentran

en forma de suspensión coloidal en la leche (Barca, 2016). Su valor biológico radica en el contenido de aminoácidos (Gómez Agudelo et al., 2005). La caseína influye directamente sobre el tiempo de coagulación de la leche, mejorando su calidad y rendimiento (García et al., 2014).

Proteínas séricas

A diferencia de la caseína, que se organiza en micelas, las proteínas del suero se encuentran dispersas en la fase acuosa de la leche en forma de solución (Barca, 2016). Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, estas proteínas tienden a asociarse con las micelas de caseína, modificando su estructura y funcionalidad (Wattiaux, 2012).

Las principales proteínas séricas son:

- β -lactoglobulina: Es la proteína de suero más abundante en la leche de vaca. Se encuentra unida a ácidos grasos participando en el transporte de compuestos lipofílicos como vitaminas liposolubles (A y D) y la unión a ligandos aumentan su estabilidad (García et al., 2014).
- α -lactoalbúmina: Es una proteína que se ha relacionado a la síntesis de lactosa. Es la subunidad reguladora del complejo lactosa sintasa.
- Inmunoglobulinas: Enzimas de naturaleza proteica que forman parte de la respuesta humoral. Las inmunoglobulinas brindan protección inmune a la glándula mamaria y al neonato.
- Lactoferrina: Son proteínas de unión al hierro que participan en su transporte, actúan como bacteriostáticos o bactericidas, siendo un componente del sistema inmune, un factor de crecimiento y un potenciador de la absorción de hierro (Valenzuela, 2020).

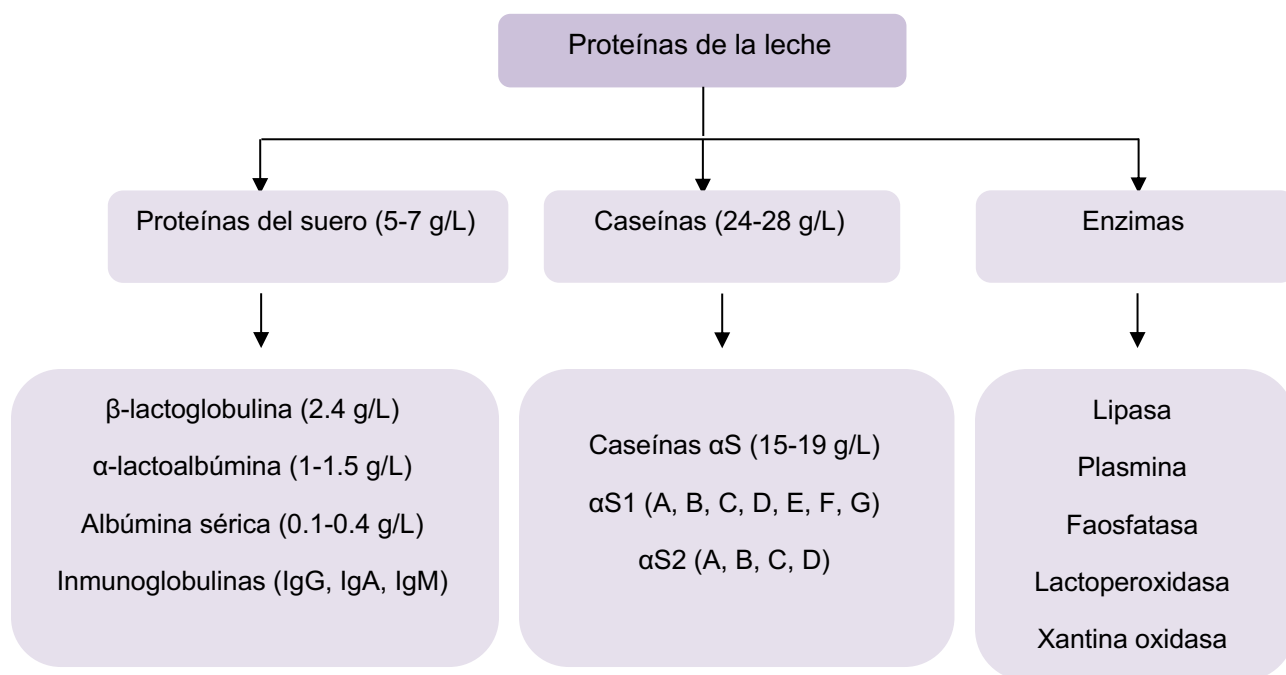


Figura 2. Esquema de las principales proteínas que se encuentran en la leche de vacas

Modificado de Ortiz-Fonseca y Hernández-Soto (2025)

2.1.4. Lactosa

La lactosa es el carbohidrato más abundante en la leche y la principal fuente de energía para el mamífero, es un disacárido compuesto por glucosa y galactosa (dos azúcares simples) que se encuentra en forma de solución (Barca, 2016).

Este carbohidrato se sintetiza dentro de la glándula mamaria específicamente en el aparato de Golgi (Taverna, 2007), su precursor es el ácido graso propiónico (García et al., 2014). Su concentración es inversamente proporcional a la concentración de lípidos y caseína, esto se debe a que la lactosa favorece el ingreso de agua a los mamocitos, contribuyendo así al volumen y composición de la leche. Barca (2016) señala que por cada 50 g de lactosa que es sintetizada, la glándula mamaria retiene 900 g de agua.

Una molécula de glucosa proveniente del torrente sanguíneo es fosforilada y epimerizada en galactosa-P mediante la vía de Leloir. La galactosa-P se une a una

segunda molécula de glucosa a través de la acción de la enzima lactosa sintetasa (Goulding et al., 2020).

Aproximadamente, 85% de la glucosa total es utilizada para la síntesis de lactosa (Barca, 2016).

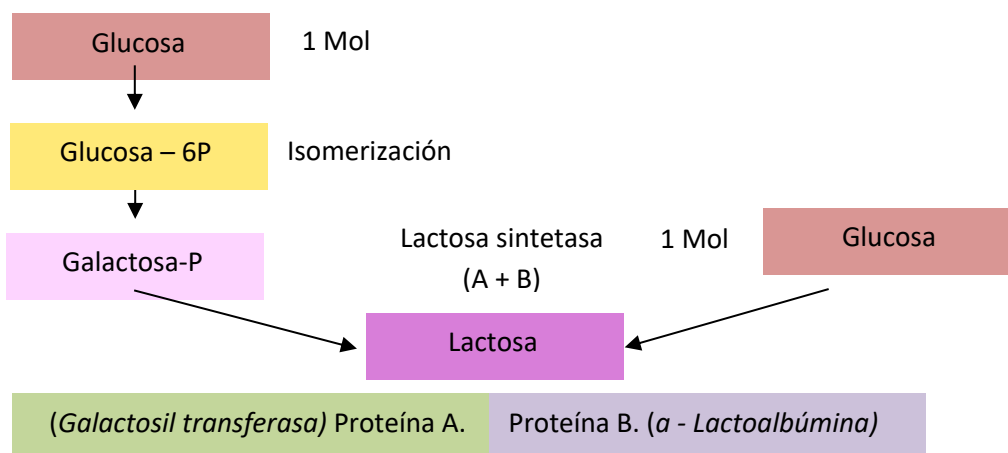


Figura 3. Esquema de la síntesis de lactosa en la glándula mamaria

Modificado de Campus FCA-UNC (2020)

2.1.5. Minerales

La leche contiene sodio, potasio, cloruro, sulfato, fosfato, citrato, calcio y magnesio. Aunque las cantidades son bajas relativamente, son constituyentes de importancia crítica para las propiedades tecnológicas y nutricionales de la leche. Algunos son solubles y otros se encuentran en un estado coloidal asociados a las micelas de la caseína viéndose afectados por la temperatura y el pH. Las variaciones en la concentración de ciertas sales presentes en la leche, como el fosfato de calcio y el citrato, afectan de manera significativa las propiedades fisicoquímicas del sistema de la caseína y la capacidad de procesamiento de la leche, particularmente en lo que respecta a la coagulabilidad del cuajo, las propiedades asociadas y la estabilidad al calor (Goulding et al., 2020).

La composición nutritiva de la leche es distinta entre especies y con una variación entre razas de la misma especie (Cuadro 3). Estas variaciones se explican por las diferencias fisiológicas y metabólicas, así como por las necesidades nutricionales específicas de las crías. Sin embargo, estos cambios deben considerarse para tomar decisiones en el manejo alimenticio y/o mejoramiento genético dependiendo del fin zootécnico de la unidad de producción.

Cuadro 3. Composición porcentual de la leche de diferentes tipos raciales de bovino

Raza	Sólidos				
	totales	Grasa	Proteína	Lactosa	Minerales
Holstein	12.3	3.4	3.3	4.9	0.68
Friesian					
Ayrshire	12.9	4.0	3.5	4.7	0.68
Pardo					
Suizo	13.4	4.0	3.6	5.0	0.73
Guersney	14.6	5.0	3.9	4.9	0.74
Jersey	14.9	5.4	3.9	4.9	0.71

Modificado de Hazard (1997)

2.2. Perfil lipídico en la leche de vaca

El estudio de los AG representa un criterio esencial en la evaluación de la calidad de la leche, debido a que estos lípidos influyen directamente en sus propiedades fisicoquímicas y en su valor nutricional (Alvear, 2021). Los lípidos en la leche pueden provenir de la alimentación por acción de la actividad microbiana en el rumen (García et al., 2014), también de la movilización de triglicéridos que se encuentran almacenado en el animal o por la síntesis *de novo* en la glándula mamaria (Bauman & Griinari, 2003).

El perfil lipídico de la leche es el resultado de variables intrínsecas como tipo racial del animal, edad, etapa de lactancia, estado fisiológico, entre otras; y variables

extrínsecas como el ambiente y la nutrición (Vieyra-Alberto, 2017). La fracción lipídica es el componente más susceptible a los cambios en su composición química (Ferlay et al., 2013), y puede ser modificado de acuerdo con las necesidades del consumidor (García et al., 2014).

De manera general, la grasa de la leche se compone de 70 % de AGS, 25 % de ácidos grasos monoinsaturados (AGMI) y 5 % de AGPI como se muestra en la Figura 4 (Angulo et al., 2009).

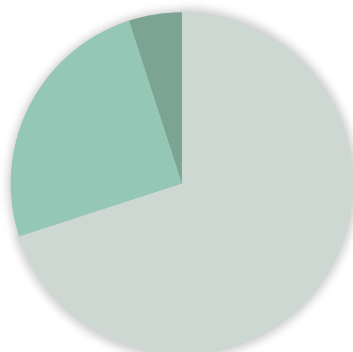


Figura 4. Proporción de ácidos grasos en la leche de vaca debido a su insaturación

Modificado de Angulo y Olivera (2009)

Los microorganismos ruminales modifican el perfil de los AG de la dieta mediante la isomerización y la biohidrogenación de los AG insaturados (Cortés et al., 2010). Así la suplementación en la dieta con semillas oleaginosas ricas en AGPI ayuda a disminuir los AGS y a incrementar el contenido de 9-18:1 (ácido oleico), 18:2 ω -6 (ácido linoleico) y 18:3 ω -3 (ácido linolénico) en la leche (Plata-Pérez et al., 2022).

2.2.1. Clasificación de ácidos grasos por su insaturación

Los ácidos grasos son considerados saturados cuando no poseen ningún doble enlace en su cadena de átomos de carbono e insaturados si esta cadena posee uno o más dobles enlaces.

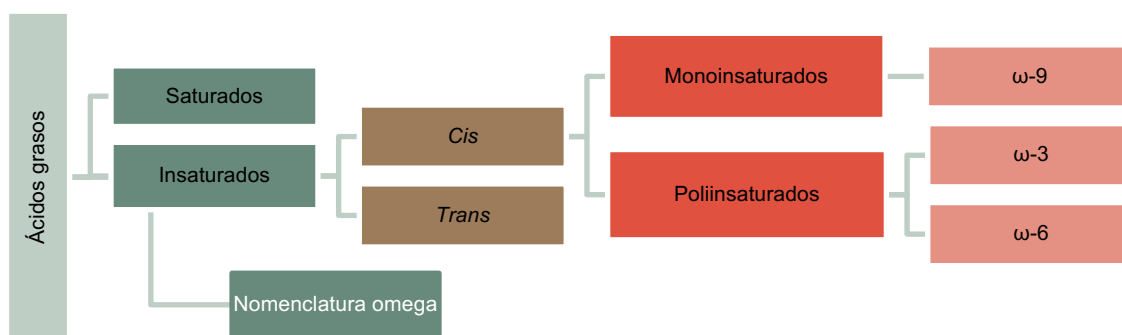


Figura 5. Clasificación de los ácidos grasos con énfasis en la nomenclatura omega

Modificado de Angulo y Olivera (2009)

2.2.1.1. Ácidos grasos saturados

Poseen únicamente enlaces sencillos entre sus átomos de carbono. El número de carbonos de la cadena puede conformarse desde 4 hasta 26 carbonos y mientras más carbonos tenga, aumenta su punto de fusión. Así una cadena de 6 carbonos es líquida a una temperatura de 20° C mientras que, a la misma temperatura, una cadena de 12 carbonos será sólida (Guzmán, 2024). Los AGS tienen efectos hipercolesteromiantes y están asociados a enfermedades cardiovasculares (Castro et al., 2014). Es necesario precisar que el ácido graso volátil (AGV) acético es el precursor de los AGS de cadena corta y media, los cuales suman una mayor cantidad de grasa en la leche (Barca, 2016). A continuación, se enlistan algunos ejemplos de ácidos grasos saturados:

- **Ácido graso palmítico:** Es el AGS más común y se encuentra en una gran variedad de alimentos, incluyendo la leche, la carne y el aceite de palma.

Constituye una fuente importante de energía y participa en la estructura de las membranas celulares además de influir en la síntesis de grasa láctea.

- **Ácido graso mirístico:** Se encuentra en la mantequilla (subproducto derivado de la leche) y la carne. En los animales el ácido mirístico participa en la síntesis y regulación de lípidos y en los procesos metabólicos. Desde el punto de vista de la salud humana, este ácido graso ha sido identificado como uno de los principales responsables del incremento de colesterol total y LDL cuando se consume en exceso.
- **Ácido graso esteárico:** También se encuentra en la carne y la mantequilla. Actúa como fuente de energía y puede ser desaturado a ácido oleico en glándula mamaria influyendo en la composición final de la grasa láctea. En la salud humana se considera un ácido graso neutro ya que no se asocia de manera significativa con el aumento del colesterol LDL.

2.2.1.2. Ácidos grasos insaturados

Son ácidos grasos con uno o más dobles enlaces entre sus átomos de carbono. Su punto de fusión disminuye mientras más dobles enlaces tenga y siempre es menor que el de los AGS. Poseen dos tipos de isomería en su estructura, la isomería posicional en la que los dobles enlaces tienen diferente ubicación en la cadena hidrocarbonada y se clasifican como ácidos grasos conjugados (poco comunes en la naturaleza) y la isomería geométrica en la que cambia la estructura espacial del doble enlace (Valenzuela, 2008).

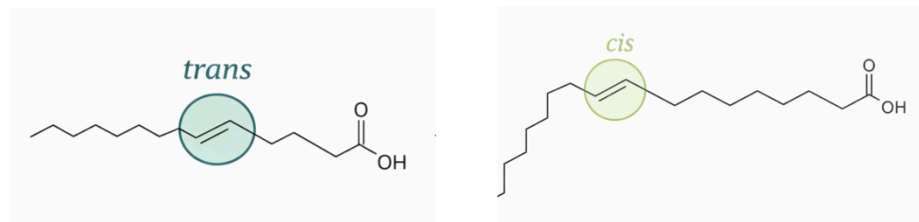


Figura 6. Representación esquemática de un ácido graso *cis* y uno *trans*

Elaborado con Chat gpt, versión 5.2 (2025)

Al formarse la isomería geométrica se puede acomodar de dos formas, los átomos que continúan la cadena y que sustituyen a los carbonos que forman el doble enlace, pueden quedar del mismo lado de la cadena generando una isomería *cis* (la más común 95%), o pueden quedar en distintos lados de la cadena formando una isomería *trans* (Valenzuela, 2008). En ellos se utiliza la nomenclatura Omega (ω) que permite clasificarlos como ω -3, ω -6 y ω -9 (Sanhueza et al., 2015).

Ácidos grasos monoinsaturados (AGMI)

Los AGMI poseen una sola insaturación o doble enlace en la cadena carbonada. Éstos no se consideran esenciales ya que se pueden sintetizar en el organismo a partir de otros AG's, por ejemplo, es el AG oleico (C18:1 ω -9) es el producto de la desaturación del AG esteárico (C18:0) (Castro et al., 2014).

Ácidos grasos poliinsaturados (AGPI)

Los AGPI poseen dos o más dobles enlaces en la cadena carbonada, lo que les da una estructura flexible, pero a la vez los vuelve más susceptibles a la oxidación. El cuerpo humano no los puede sintetizar por lo que se consideran esenciales (Castro et al., 2014). En humanos, la ingesta de AGPI disminuye el padecimiento de cáncer, así como la posibilidad de padecer enfermedades cardiovasculares, hipertensión y

artritis, incluso se ha reportado que ayudan a mejorar la agudeza visual (Gao et al., 2009).

Los AGPI se dividen en tres grupos principales: ω -3 (omega-3), ω -6 (omega-6) y ω -9 (omega-9), según la posición del primer doble enlace en la cadena, contando desde el extremo metilo. El grupo 9 no es esencial ya que el cuerpo humano puede sintetizarlo a partir de un ácido graso saturado con la insaturación en la posición del carbono 9. Por el contrario, nuestro organismo en las posiciones 3 y 6 no es capaz de producir insaturaciones, volviéndolos AG's esenciales como el caso de los AG's linoléico (C18:2, ω -6) y α -linolénico (C18:3, ω -3) (Martínez del Olmo, 2012).

2.2.2. Clasificación de ácidos grasos por el número de carbonos

Cadena corta

Son los AG's más predominantes en la leche, son sintetizados mediante la vía *de novo* en glándula mamaria. Dentro de estos AG's destaca el caprílico y el butírico que son los responsables del sabor de la leche (Wattiaux, 2012), siendo sus precursores los AGV's acético y butírico (García et al., 2014).

Algunos ejemplos de AG's de cadena corta son:

- Butírico = C4:0
- Caproico = C6:0
- Caprílico = C8:0
- Cáprico = C10:0
- Undecanóico = C11:0

Cadena media

Los AG de cadena media (C12 a C16) pueden ser sintetizados en la glándula mamaria o pueden llegar por medio de la sangre unidos a la albúmina sérica (García et al., 2014).

Algunos ejemplos de AG de cadena media son:

- Láurico = 12:0
- Mirístico = C14:0
- Miristoleico = C14:1
- Palmítico = C16:0
- Palmitoleico = C16:1

Cadena larga

La mayoría de los AG de cadena larga son insaturados siendo el AG oleico (cadena de 18 carbonos) el principal y los polinsaturados como los AG's linoleico y linolénico, dos AG's esenciales que no pueden ser sintetizados en el cuerpo y deben adquirirse de la dieta (Martínez et al., 2010). Estos AG's de cadena larga no se pueden formar en la glándula mamaria como los de cadena corta y media (Martínez et al., 2010) debido a la falta de enzimas elongasas necesarias, éstos pueden tener dos orígenes: 1) triacilglicéridos (TAG) transportados en quilomicrones y en lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) de origen mayoritariamente intestinal y, 2) a partir de ácidos grasos no esterificados (AGNE) movilizados desde el tejido adiposo (Wattiaux, 2012; García et al., 2014).

Algunos ejemplos de AG's de cadena larga son:

- Heptadecanóico = C17:0
- Esteárico = C18:0
- Linoleico = C18:2 cis 9 cis 12
- Linolénico = C18:3 cis9 cis 12 cis 15

- Oleico = C18:1 cis 9
- Vaccénico C18:1 *trans*-11

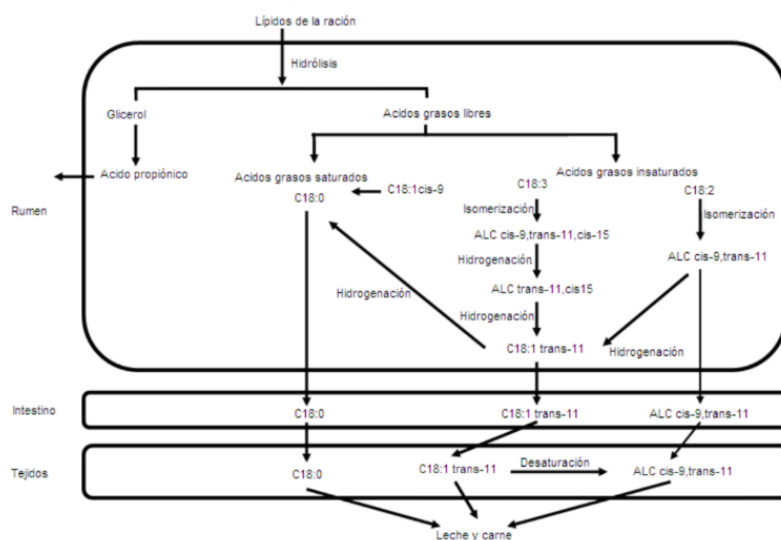
Cuadro 4. Nombre común y nomenclatura química de principales ácidos grasos presentes en la leche de vaca

Nombre común	Nomenclatura química	%	Número de átomos		
			C ¹	H ²	O ³
Ácidos grasos saturados					
Butírico	Butanóico	4.5	4	8	2
Capróico	Hexanóico	2.2	6	12	2
Caprílico	Octanóico	2.5	8	16	2
Cáprico	Decanóico	3.8	10	20	2
Láurico	Dodecanoico	5.0	12	24	2
Mirístico	Tetradecanóico	11.0	14	28	2
Palmítico	Hexadecanóico	25.0	16	32	2
Esteárico	Octadecanóico	7.0	18	36	2
Ácidos grasos monoinsaturados					
Oleico	Octadecanóico Cis-9	3.0	18	34	2
Ácidos grasos poliinsaturados					
Linoleico	Octadecanóico Cis-9,12	2.0	18	32	2
Linolénico	Octadecanóico Cis-6,9,12	0.7	18	30	2
Araquidónico	Eicosatetraenoico Cis-5,8,11,14	0.7	20	32	2

Modificado de García et al. (2014)

2.3. Síntesis de ácidos grasos

Los AG's cuya cadena tiene menos de 12 carbonos son transportados unidos a la albúmina sérica hacia el hígado por la vena porta (Martínez et al., 2010).



Tanaka (2005)

2.3.1 Síntesis *de novo*

Los AG's comienzan su síntesis dentro de las mitocondrias con la producción de Acetil Coenzima A (Acetil-CoA) que proviene de la oxidación de los ácidos acético y butírico generados en la fermentación ruminal tras el consumo de carbohidratos (García et al., 2014). El butirato es transformado a β -hidroxibutirato en hígado y rumen, principalmente y es transportado junto con el acetato a las células epiteliales mamarias a través de la sangre para ser usados en la síntesis de AG's. Ya dentro de la célula mamaria, ambos son activados por la enzima Acil-CoA Sintetasa de

Cadena Corta (ACSS) resultando en Acetil-CoA y β -hidroxiisobutiril-CoA respectivamente. En el citosol, el Acetil-CoA se carboxila por la enzima Acetil-CoA Carboxilasa Alfa (ACACA) para formar malonil-CoA y con la enzima sintasa de ácidos grasos (FASN) se forman los AG's de cadena corta y media (4-16) (Martínez et al., 2010). El Acetil-CoA actúa como sustrato de la FASN, mientras que las dos unidades de carbono provenientes del malonil-CoA se incorporan de manera secuencial a la cadena en crecimiento, permitiendo la formación de AG's de mayor longitud (Tian et al., 2022). El ácido palmítico es el principal resultado de la síntesis *de novo* de AG's y dentro de la mitocondria puede ser elongado hasta 22 carbonos (Martínez et al., 2010).

2.3.2. Transporte y absorción

Los ácidos AGCL no pueden sintetizarse en la glándula mamaria así que se absorben de la sangre circulante. La lipoproteína lipasa (LPL) hidroliza el TAG junto con el receptor de lipoproteínas de muy baja densidad (VLDLR) resultando en la liberación de AGCL de las VLDL. Entonces los AGCL pueden entrar a la célula epitelial mamaria con ayuda de la translocasa de AG's (CD36) y la familia de proteínas transportadoras de solutos (SLC27) y se activan por la Sintetasa de AcilCoA de cadena larga miembro 1 (ACSL1) para formar AGCL-CoA que por acción de la proteína transportadora de ácidos grasos 3 (FABP3) es transportado a la membrana del retículo endoplásmico. La enzima Estearoil-CoA desaturasa (SCD) desatura la Esteaoril Coenzima A para liberar ácido oleico. La enzima glicerol-3-fosfato aciltransferasa (GPAM) une los AGCL-CoA al glicerol-3-fosfato, específicamente al sn-1 para la síntesis de ácido lisofosfatídico (LPA). Luego la enzima 1-acilglicerol-3-fosfato O-aciltransferasa 6 (AGPAT) cataliza un segundo ácido graso de cadena larga-CoA al glicerol 3 fosfato, pero ahora al sitio sn-2 para formar ácido fosfatídico (PA) que con la enzima Lipina-1 (LPIN1) se convierte a diacilglicerol (DAG). Finalmente, el diacilglicerol aciltransferasa (DGAT) cataliza la

unión de los grupos acilo del AcetilCoA graso al N-1, 2 DAG terminando con la síntesis de TAG. Se forma un complejo al combinarse la enzima xantina deshidrogenasa (XDH) con la adipofilina ADFP y butirofilina 1A1 (BTN1A1) que estimula la secreción de gotas lipídicas (Tian et al., 2022).

2.4. Ácido linoleico conjugado (CLA)

El CLA es una mezcla posicional y geométrica del ácido linoleico (Bauman y Grinari, 2003). Son compuestos con múltiples beneficios como agente antitumoral (Gómez, 2019), también la inhibición y regresión de la aterosclerosis, mejora el crecimiento óseo y reduce el riesgo de padecer diabetes (Gao et al., 2009). La cadena de AGPI que tienen doble enlace generalmente se organiza de forma que quede en medio un carbono que no participa en la insaturación, dando resultado a una estructura “no conjugada”, si ese carbono intermedio desaparece, la estructura será entonces “conjugada” como es el caso del CLA (Granados-Rivera et al., 2018).

El CLA se puede producir en el rumen como un intermediario del proceso de BH del ácido linoléico por acción de las bacterias ruminales o se puede sintetizar en los tejidos a partir del AG vaccénico (Granados-Rivera et al., 2018).

2.5. La linaza y sus efectos en la calidad nutritiva de la leche

Chilliard et al. (2009) mencionan que algunos de los beneficios de la inclusión de semillas oleaginosas con alto contenido de ácido linolénico en la dieta de vacas lecheras son el incremento de la concentración de CLA en la leche a la vez que reduce el contenido de AGS y la disminución de las emisiones de metano (CH₄). De acuerdo con Gao et al. (2009), la proporción de ácidos grasos insaturados aumenta hasta en un 40%. Ambos autores concluyen que este efecto se ve potenciado particularmente cuando dichas fuentes lipídicas se incorporan en dietas con un elevado nivel de concentrado o en aquellas basadas en ensilaje de maíz.

La semilla de linaza es de entre las semillas oleaginosas, la que tiene mayor proporción de ácido alfa linolénico (cis-9, cis-12, cis-15 18:3) y linoleico (cis-9, cis-12 18:2), resultando en un mayor contenido de AGPI y de CLA en la fracción lipídica de la leche (Akraim et al., 2007).

La inclusión de semillas oleaginosas en la dieta de los rumiantes estimula la producción de ácido propiónico mientras que disminuye la del ácido acético. Este efecto se atribuye a la liberación de glicerol durante el proceso de lipólisis de los triglicéridos (Plata-Pérez, 2022).

Existen diferentes isómeros del CLA. La leche de los rumiantes es particularmente rica en el isómero C18:2 cis-9, *trans*-11 CLA (ácido ruménico) que representa entre el 75% y el 90% del total de isómeros del CLA en la leche y el cual resulta beneficioso para la salud gracias a sus efectos antiaterogénicos y que ayuda a reducir la grasa corporal (Vieyra-Alberto, 2017).

Martínez del Olmo (2012) analizó el perfil de AG's en la leche de 6 vacas lecheras multíparas de raza Holstein a las que clasificó en 3 grupos. Las raciones experimentales fueron: control (ración sin grasa añadida), soja (ración con un 4 % de aceite de soja en el concentrado y linaza (ración con un 4 % de aceite de linaza en el concentrado). El contenido en AGPI fue inferior ($p < 0.05$) en la leche de los animales que no consumieron aceite frente a la de los que consumieron soja o linaza y el de PUFA de la serie omega 3 fue superior ($p < 0.0001$) en la leche de los animales que consumieron linaza (1.46 %), seguido del tratamiento con soja (0.816 %) y por último el tratamiento control (0.576 %).

Posteriormente, Martínez del Olmo (2012) realizó un segundo estudio experimental con 374 vacas lecheras de raza Holstein que se agruparon en 6 lotes homogéneos y fueron distribuidos al azar a los distintos tratamientos experimentales, en dos réplicas por tratamiento. Las raciones experimentales fueron las mismas que se utilizaron en el experimento 1.

Los resultados indicaron que la grasa de la leche de los animales que consumieron aceite (soya o linaza) presentó un mayor contenido en los dos isómeros estudiados del CLA (C18:2 cis 9, *trans* y C18:2 *trans*-10, cis 12). La leche de las vacas que consumieron aceite de linaza presentó un mayor contenido en C18:2 cis-9, *trans*-11, comparado con la leche de vacas que estuvieron en el tratamiento con aceite de soya ($p < 0.05$). La leche de los animales de los tratamientos con aceite (soya o linaza) presentó un mayor contenido en el total de AG's ($p < 0.0001$), monoinsaturados ($p < 0.001$) y poliinsaturados ($p < 0.0001$) que la de los que no consumieron aceite en la ración (grupo control). El mayor contenido en AGPI n-3 ($p < 0.0001$) se observó en la leche de los animales que consumieron aceite de linaza (1.34 %) seguido del tratamiento soya (0.891 %) y por último el tratamiento control (0.845 %).

En resumen, la incorporación de aceites vegetales insaturados en la alimentación conduce a un incremento de los AGPI ω -3 y del ácido ruménico (C18:2 cis-9, *trans*-11 CLA), lo cual contribuye a obtener una leche con mejores propiedades para la salud humana.

Cortés et al. (2010) compararon la leche de cuatro vacas Holstein alimentadas con y sin la inclusión de productos de linaza, demostrando que la leche de las vacas cuyas dietas incluían productos de linaza tenía mayor concentración del AG oleico.

Gao et al. (2009) observaron un incremento de los AGCL, AG's monoinsaturados y poliinsaturados, incluyendo el CLA de las vacas alimentadas con soya y linaza.

Chillard et al. (2009) utilizaron linaza cruda, extruida y aceite de linaza donde el principal efecto de la suplementación con semilla de linaza cruda entera fue el aumento de las concentraciones en leche de 18:0 y cis-9 18:1.

Las semillas crudas enteras podrían permitir una BH más compleja de AGI que la administración de aceite a rumiantes lecheros. La extrusión aumenta la tasa de

liberación de aceite de las semillas al fluido ruminal en comparación con las semillas intactas (Chillard et al., 2009).

Akraim et al. (2007) utilizaron 30 vacas lactantes para investigar los efectos de una mezcla cruda o extruida de linaza y salvado de trigo sobre los AG's en plasma y leche. Las dietas con linaza, con un 16.6 % de mezcla de linaza en materia seca, disminuyeron la producción de leche y el porcentaje de proteína. Disminuyeron las proporciones de ácidos grasos con menos de 18 carbonos en plasma y leche, dando como resultado proporciones de cis-9, cis-12 y cis-15 (18:3) más de tres y cuatro veces superiores en plasma y leche, respectivamente, mientras que las proporciones de cis-9 y cis-12 (18:2) se redujeron entre un 10 % y un 15 %.

Se concluyó que la adición de linaza puede mejorar la proporción de ácidos linoleico y linolénico conjugados, y que la extrusión aumenta aún más las proporciones de intermediarios de BH ruminal en la grasa de la leche.

III. JUSTIFICACIÓN

La leche de vaca es uno de los alimentos más nutritivos a nivel mundial, ya que es fuente esencial de proteínas, vitaminas y minerales indispensables para el crecimiento y mantenimiento de la salud en las diferentes etapas de la vida de los mamíferos. Además, representa una de las principales bases de la alimentación en países productores como México, en donde su consumo forma parte de la cultura alimentaria y de la seguridad nutricional de la población.

Durante los últimos años se ha puesto especial atención en la composición lipídica de la leche, dado que el perfil de AG's influye directamente en sus beneficios y en los posibles riesgos para la salud humana. Se ha demostrado que una mayor proporción de AGPI, especialmente los de la familia omega 3 tienen efectos benéficos sobre el consumidor, lo que incrementa la importancia de desarrollar estrategias de alimentación animal que contribuyan a mejorar la calidad nutricional de la leche.

Una de las maneras de mejorar el perfil de ácidos grasos de la leche es la inclusión de semillas de linaza en la dieta de vacas lecheras, siendo una alternativa sustentable gracias a las cantidades de ácidos grasos omega 3 y otros compuestos capaces de modificar de manera favorable el perfil lipídico de la leche, obteniendo un alimento disponible para el humano más saludable.

IV. HIPÓTESIS

La inclusión de 3 % de semilla de linaza molida en la dieta de vacas lecheras incrementará el contenido de ácidos grasos insaturados en la leche, lo cual optimizará su perfil lipídico; por ello, constituye una opción viable frente a una dieta convencional.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la inclusión de 3 % de semilla de linaza molida en la dieta de vacas Holstein primíparas en estabulación completa sobre el perfil de ácidos grasos de la leche y su persistencia a lo largo del tiempo.

5.2. Objetivos específicos

1. Cuantificar el contenido de ácidos grasos en la leche de vacas Holstein primíparas en estabulación, alimentadas con y sin la inclusión de semilla de linaza molida.
2. Evaluar la persistencia de la concentración de ácidos grasos en la leche de vacas Holstein primíparas en estabulación a lo largo del tiempo, tras la suspensión de la semilla de linaza molida después de 20 días de inclusión.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

Todos los procedimientos se realizaron siguiendo las normas de bienestar animal y manejo de animales de experimentación establecidas en la NOM-062-ZOO-1990 y la NOM-051-ZOO-1995.

6.1. Localización

El estudio y la toma de muestras se llevaron a cabo en una unidad de producción lechera comercial situada en Cuautepec de Hinojosa, Hidalgo, México, con coordenadas 20.032798, - 98.309958 según Google Maps®. El sitio se encuentra a una altitud aproximada de 2,200 m y presenta una precipitación media anual de 812 $\pm$ 287 mm (CONAGUA, 2023).

6.2. Características de los animales

Se utilizaron 12 vacas Holstein en estabulación, primíparas, en el segundo tercio de lactación, con una producción promedio de leche de 30.6 litros al día. Las vacas fueron asignadas de manera aleatoria en cada uno de los tratamientos: 1) Testigo = dieta completa mezclada; 2) Linaza = dieta completa mezclada con la inclusión de 3 % sobre la materia seca de semilla molida de linaza. El balanceo de dietas completas mezcladas se realizó con el programa Dairy NRC versión 1.1.10 (<https://nutritionmodels.com>) para una necesidad de 17.25 % de proteína cruda y 3.48 Mcal de energía digestible por kg de materia seca.

6.3. Desarrollo experimental

El diseño experimental fue completamente al azar con mediciones repetidas repetidas en el tiempo.. Se consideraron como efectos fijos las dietas experimentales (Testigo y Linz), los días de medición (0d, 5d, 10d, 15d, 20d, 25d,

30d, 35d y 40d y 45d) y su interacción, mientras que la vaca se consideró como el factor aleatorio.

En los comederos se ofreció un 5 % adicional al consumo máximo estimado para vacas con estas características, distribuyéndose en dos raciones diarias. En todo momento las vacas tuvieron libre acceso al agua potable. Se registró la producción de leche de ambos ordeños para obtener una alícuota diaria de 50 ml por vaca para el análisis de perfil lipídico.

6.4. Análisis de laboratorio

Para el análisis de los ácidos grasos en leche se extrajo la grasa por ultracentrifugación (Feng et al., 2004); la metilación se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Christie (1982), con modificaciones de Chouinard et al. (1999). Los metil ésteres de los ácidos grasos de alimentos y leche se separaron y cuantificaron por cromatografía de gases (Perkin Elmer Clarus 500), con una columna capilar de 100 m x 0.25 mm x 0.2 μ m (SUPELCO TM-2560), utilizando nitrógeno como gas acarreador. El detector y el inyector se mantuvieron a 260°C, la temperatura inicial del horno fue 140°C por 5 min, aumentando 4°C por minuto hasta llegar a 240°C. Cada pico se identificó de acuerdo con los tiempos de retención de estándares de ésteres metílicos (Supelco 37 Component FAME Mix, *trans*-vaccenic acid y linoleic acid conjugated de SIGMA- ALDRICH). Los valores de ácidos grasos fueron calculados en g por cada 100 g del total de ácidos grasos.

6.5. Análisis estadístico

El contenido de los ácidos grasos fue analizado en dos momentos (0 a 20 días y de 25 a 45 días), ambos con un modelo mixto, con el PROC MIXED de SAS (2002) como sigue:

$$Y_{ijk} = \mu + \text{vacai} + \text{Txj} + \text{Tiempok} + (\text{Tx} * \text{Tiempo})_{jk} + E_{ijkl}.$$

Donde:

Y_{ijk} = Es la respuesta de las variables;

μ = Efecto de la media general;

Vaca = Efecto aleatorio de la vaca (1,...12);

Txj = Efecto fijo del tratamiento (Testigo vs Linaza);

Tiempo = Efecto fijo del día de medición (0 - 20 y 25 - 45)

(Tx*Tiempo) = Efecto de interacción entre tratamiento y tiempo.

E_{ijk} = error residual.

VII. RESULTADOS

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso butírico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en los días 30 y 40 de muestreo.

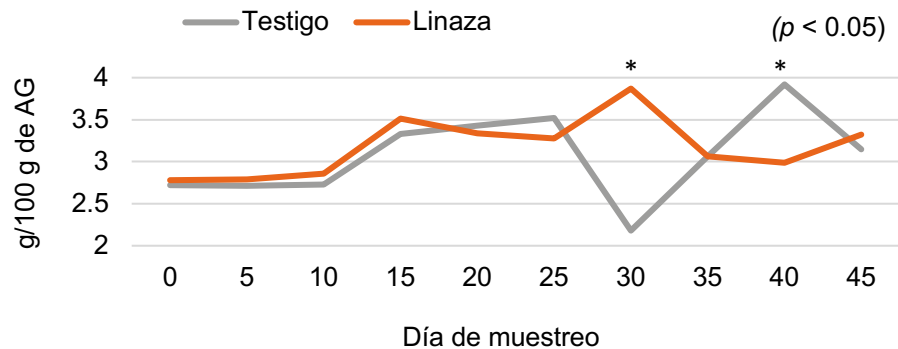


Figura 8. Contenido del ácido graso butírico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso caproico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 30 de muestreo.

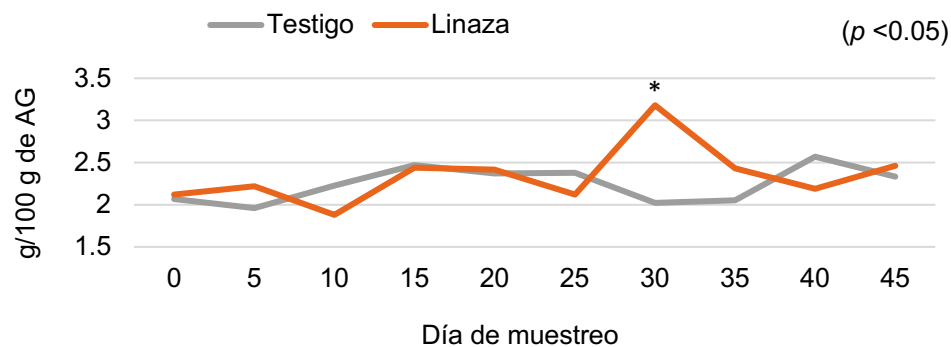


Figura 9. Contenido del ácido graso caproico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso caprílico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 30 de muestreo.

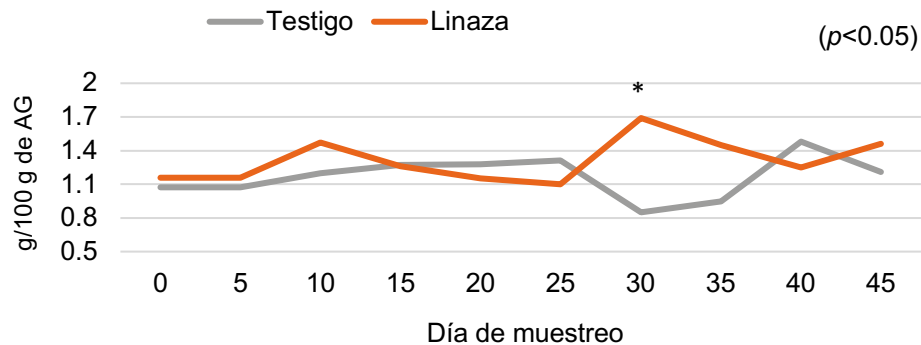


Figura 10. Contenido del ácido graso caprílico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso caprílico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en los días 30 y 35 de muestreo.

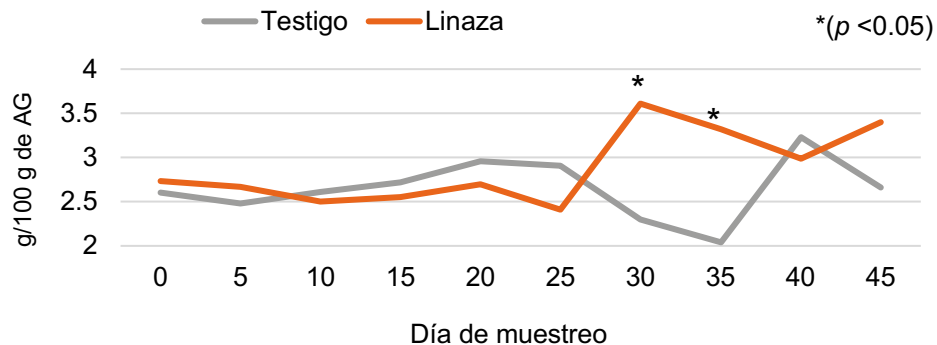


Figura 11. Contenido del ácido graso cáprico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

Se observó diferencia ($p < 0.05$) en el contenido del ácido graso undecanoico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 10 de muestreo.

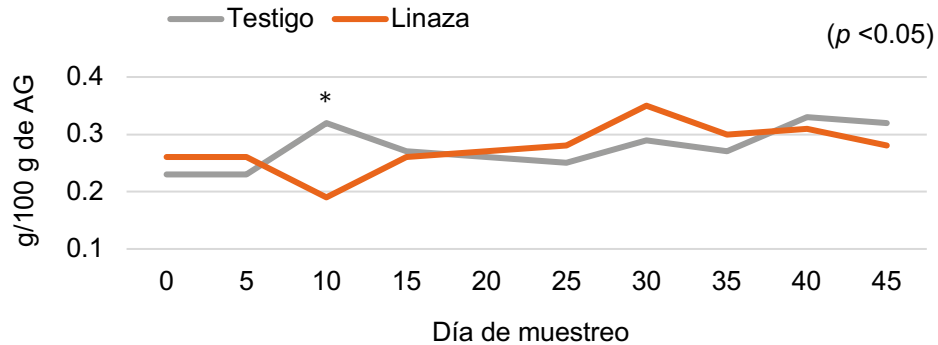


Figura 12. Contenido del ácido graso undecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso láurico entre tratamientos a través del tiempo.

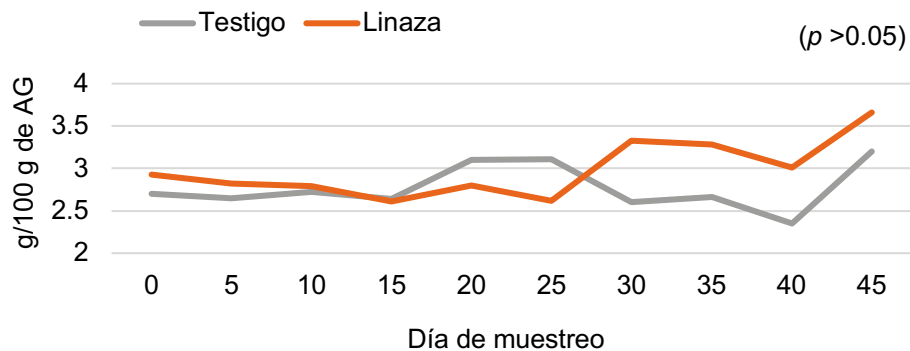


Figura 13. Contenido del ácido graso láurico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso tridecanoico entre tratamientos a través del tiempo.

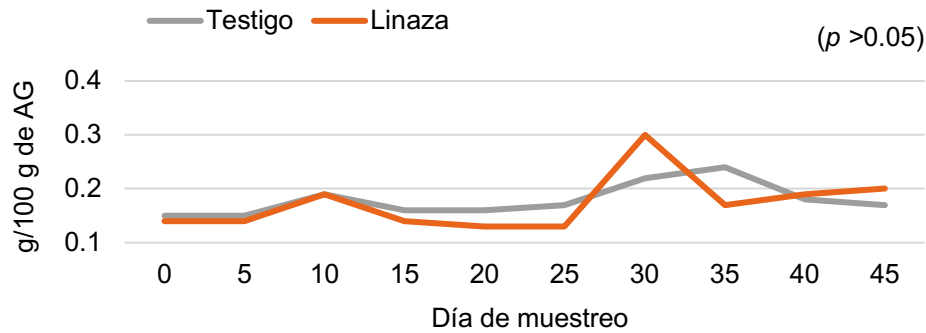


Figura 14. Contenido del ácido graso tridecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso mirístico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 45 de muestreo.

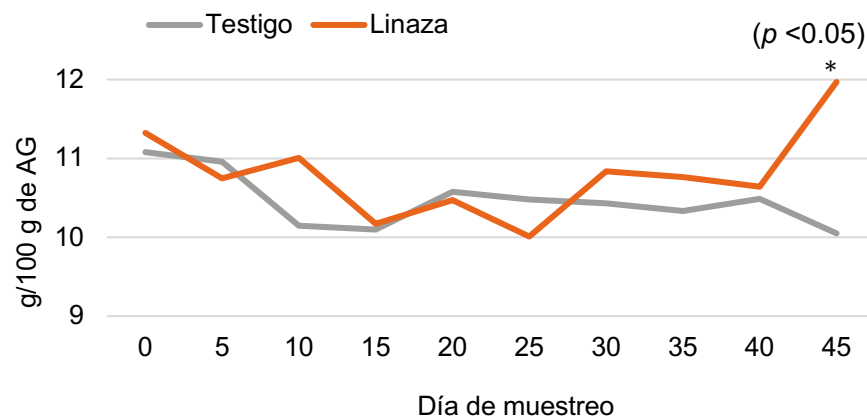


Figura 15. Contenido del ácido graso mirístico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso miristoleico entre tratamientos a través del tiempo.

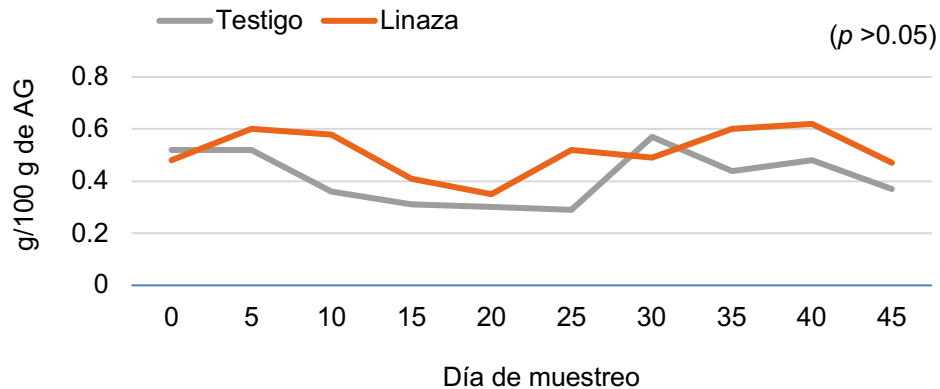


Figura 16. Contenido del ácido graso miristoleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso pentadecanoico entre tratamientos a través del tiempo.

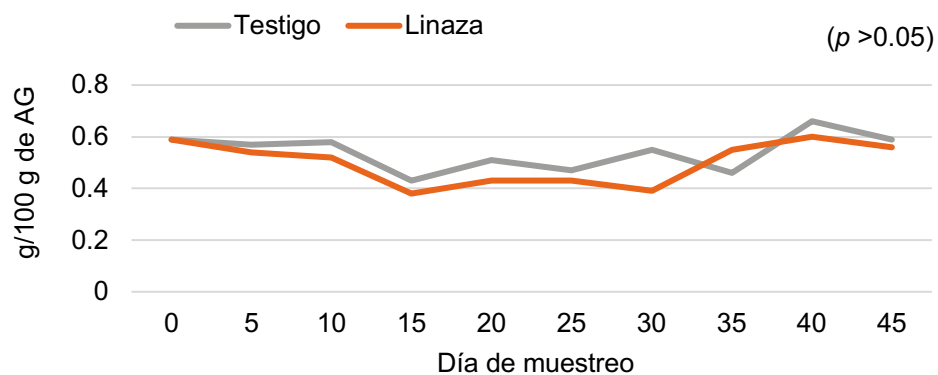


Figura 17. Contenido del ácido graso pentadecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso palmítico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en los días 15 y 35 de muestreo.

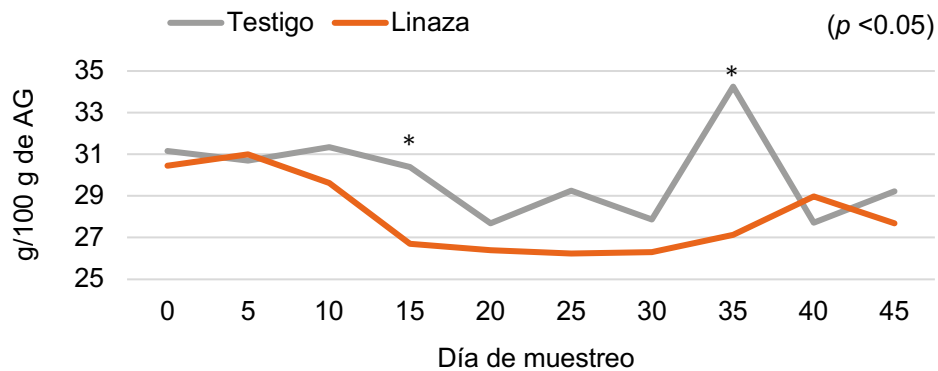


Figura 18. Contenido del ácido graso palmítico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso heptadecanoico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 10 de muestreo.

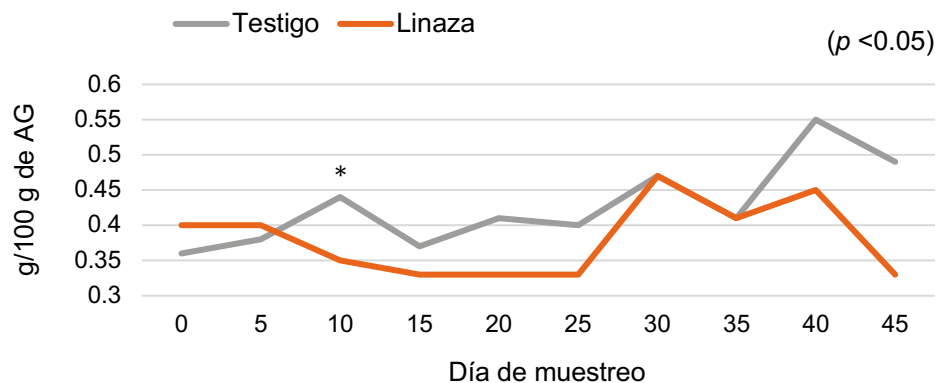


Figura 19. Contenido del ácido graso heptadecanoico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso esteárico entre tratamientos a través del tiempo; Sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 30 de muestreo.

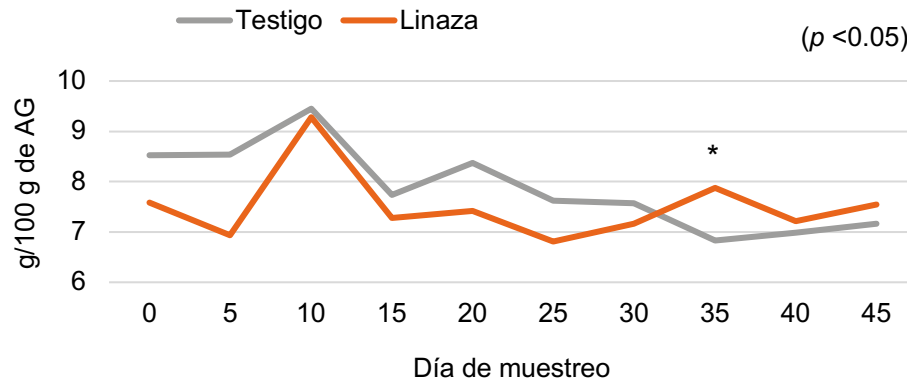


Figura 20. Contenido del ácido graso esteárico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso vaccénico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 10 de muestreo.

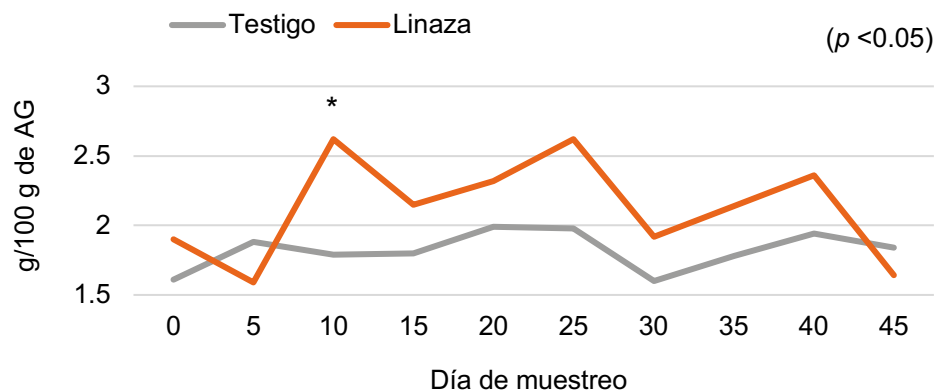


Figura 21. Contenido del ácido graso vaccénico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso oleico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en los días 15 y 25 de muestreo.

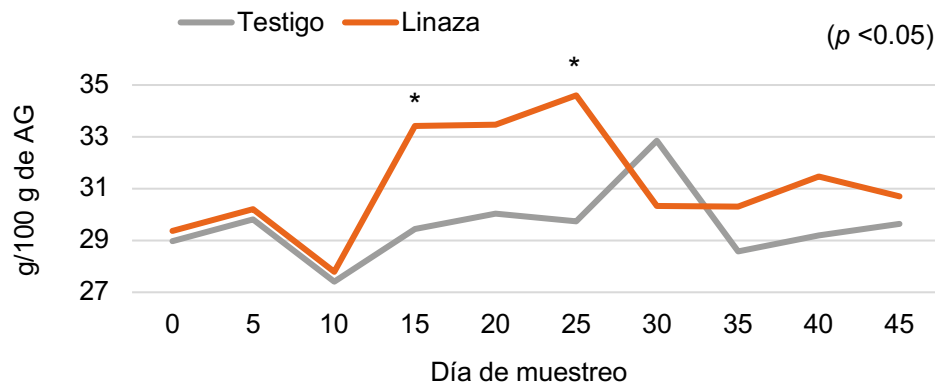


Figura 22. Contenido del ácido graso oleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido graso linoleico entre tratamientos a través del tiempo; sin embargo, hubo una diferencia ($p < 0.05$) en el día 30 de muestreo.

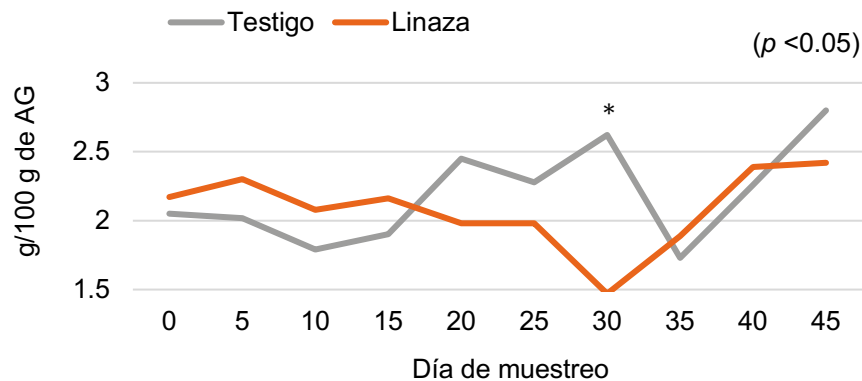


Figura 23. Contenido del ácido graso linoleico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

Se observó diferencia ($p < 0.05$) en el contenido del ácido graso linolénico entre tratamientos a través del tiempo.

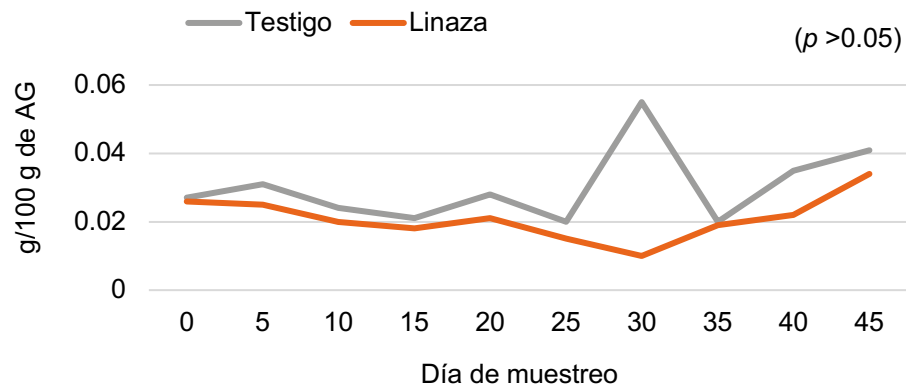


Figura 24. Contenido del ácido graso linolénico en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

No se observó diferencia ($p > 0.05$) en el contenido del ácido linoleico conjugado (CLA) entre tratamientos a través del tiempo.

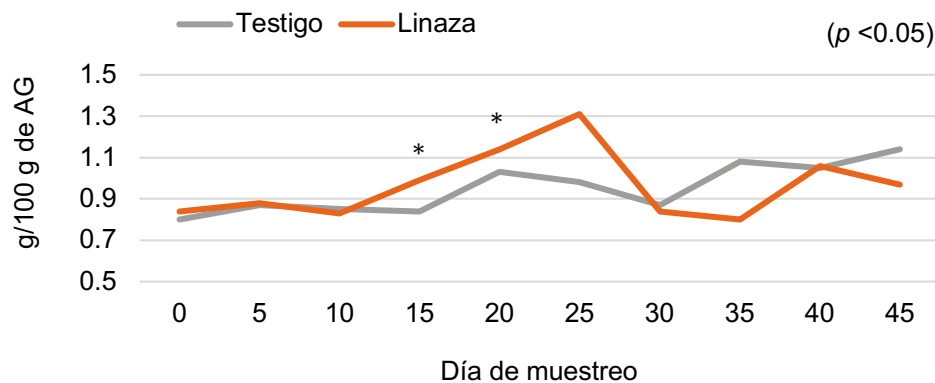


Figura 25. Contenido del ácido linoleico conjugado (CLA) en la leche de vacas primíparas alimentadas con semilla de linaza molida

VIII. DISCUSIÓN

La inclusión de 3 % de semilla de linaza molida en la dieta de vacas Holstein primíparas tuvo un efecto significativo sobre el perfil de ácidos grasos de la leche. Los incrementos observados en oleico, α -linolénico (ω -3), vaccénico, CLA (principalmente el isómero cis-9, trans-11) y linoleico a partir del día 10 respaldan que la linaza es una estrategia eficaz para optimizar la calidad lipídica de la leche, al aumentar la proporción de ácidos grasos insaturados y, de forma concomitante, reducir la fracción de ácidos grasos saturados. Este patrón coincide con lo reportado en síntesis cuantitativas y metaanálisis que muestran que los suplementos lipídicos de oleaginosas—particularmente linaza—incrementan consistentemente AGI, vaccénico y CLA en leche, aunque la magnitud depende de la forma de suministro, dosis y dieta basal (Plata-Pérez et al., 2022; Glasser et al., 2008; Leduc et al., 2017).

Estos resultados concuerdan con estudios previos que destacan el efecto de la linaza (y otras oleaginosas) para mejorar el perfil lipídico de la leche. En particular, se ha documentado que el aporte de C18:3 n-3 procedente de linaza favorece el incremento de intermediarios de biohidrogenación ruminal como el trans-11 C18:1 (ácido vaccénico), que puede convertirse en la glándula mamaria a CLA cis-9, trans-11 (ácido ruménico) mediante la Δ 9-desaturasa, explicando aumentos sostenidos de CLA cuando se suministra linaza en distintas presentaciones (Caroprese et al., 2010; Chilliard et al., 2009; Côrtes et al., 2010; Gonthier et al., 2005). A la vez, la literatura describe que cambios en las rutas de biohidrogenación (condicionados por el tipo y disponibilidad del lípido) determinan el perfil final de isómeros y su transferencia a leche (Loor et al., 2005), y que ciertos intermediarios lipídicos pueden modular la síntesis de grasa láctea (Bauman & Griinari, 2003), por lo que la interpretación debe considerar la forma de inclusión (semilla molida/entera, aceite, sales cálcicas) y la dieta basal (Benchaa et al., 2012; Leduc et al., 2017). Finalmente, dado que, el CLA cis-9, trans-11 es el isómero predominante en leche

y derivados, se ha revisado su potencial interés en nutrición humana y efectos biológicos reportados (Haro et al., 2006), lo cual aporta contexto a la relevancia de las mejoras observadas en el perfil de ácidos grasos.

Con respecto al efecto del tiempo de inclusión del linaza en las dietas de vacas, es importante mencionar que el contenido de ácidos grasos benéficos se incrementó conforme se aumentaban los días de inclusión de esta semilla de oleaginosa y por el contrario, los ácidos grasos saturados se redujeron. En el caso del CLA, el cambio en su concentración fue a partir del día 15 como se muestra en la Figura 25 lo que indica que se pudiera reducir el tiempo de adaptación en las dietas con estrategias similares. En el metaanálisis de Plata-Pérez observaron cambios a partir del día 21 lo que difiere de nuestros resultados. El periodo de adaptación de una dieta depende de múltiples factores como el tipo de oleaginosa (Plata-Perez et al., 2022), el perfil lipídico de algún ingrediente en particular (Palmquist y Jenkins, 2017) el procesamiento de la semilla (Chilliard et al., 2009), el nivel de grasa añadida a través de un ingrediente (Jenkins, 2003) y la interacción de la grasa o extracto etéreo con la fibra detergente neutro de la dieta completa (Ángeles-Hernández et al., 2020).

No obstante, al suspender la dieta que contenía semilla molida de linaza a las vacas se observó una desestabilización de los contenidos de ácidos grasos en la leche. Por un lado, los ácidos grasos saturados de cadena corta (C4:0 – C10:0) se incrementaron en el tratamiento con semilla molida de linaza, mientras que la mayoría ya no mostró diferencia entre el grupo testigo y el grupo con semilla de linaza, debido a la gran variabilidad que tuvieron las unidades experimentales, esta variabilidad se ha reportado en otros estudios (Soyeurt et al., 2008). La producción no sostenida y constante de los ácidos grasos pudo deberse a la reestructuración de la comunidad bacteriana, quienes se encargan de la biohidrogenación ruminal como *Butyrivibrio spp.* (Buccioni et al., 2012)

IX. CONCLUSIÓN

La inclusión de 3 % de semilla de linaza molida en la dieta de vacas Holstein primíparas en estabulación modificó de manera positiva el perfil lipídico de la leche, observándose cambios favorables a partir del día 15 de suplementación; no obstante, al suspender la inclusión de linaza se presentó alta variabilidad en la concentración de ácidos grasos en la leche, lo que sugiere que la persistencia de estos cambios puede diferir entre animales y que el efecto posterior al retiro del ingrediente no es uniforme.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, D., Capdevila, N., Segundo, M.J. (2005). Ácidos grasos esenciales. *Offarm*, 24(4), 96-102.
- Akram, F., Nicot, M.C., Juaneda, P., Enjalbert, F. (2007). Conjugated linolenic acid (CLnA), conjugated linoleic acid (CLA) and other biohydrogenation intermediates in plasma and milk fat of cows fed raw or extruded linseed. *Animal*, 1(6), 835-843. <https://doi.org/10.1017/S175173110700002X>.
- Alvear, D.C., Guerrero, J.D., Bonifaz, N.F., Noriega, P.F. (2021). Calidad composicional y concentración de ácidos grasos omega-3 (alfa-linolénico) y omega-6 (linoleico) presentes en leche bovina de tres regiones naturales del Ecuador. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 68(2), 150-169. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v68n2.98027>.
- Angulo, J., Mahecha, L., Olivera, M. (2009). Síntesis, composición y modificación de la grasa de la leche bovina: Un nutriente valioso para la salud humana. *Revista MVZ Córdoba*, 14(3), 1856-1866. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012202682009000300010&script=sci_arttext
- Barca Tarigo, J., Meikle, A., Chilbroste, P., Carriquiry, M., & Olazabal, L. (2016). Perfil de ácidos grasos en leche de vacas alimentadas en base a dieta totalmente mezclada combinadas o no con diferentes tiempos de pastor.
- Bauman, D. E., & 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>.

- Bidot Fernández, A. (2017). Composition, Attributes and Benefits of Goat Milk: Literature Review. Revista de producción animal. [10.15744/2393-9060.3.401](https://doi.org/10.15744/2393-9060.3.401)
- Cámara Nacional de Industriales de la Leche. (2011). El libro blanco de la leche y los productos lácteos: Análisis de conocimientos científicos y consideraciones sobre el valor nutrimental y consumo de la leche y los productos lácteos (1.^a ed.). CANILEC. https://www.uv.mx/personal/pcervantes/files/2012/05/libro_blanco_de_la_leche.pdf
- Castro-Hernández, H., González-Martínez, F.F., Domínguez-Vara, I.A., Pinos-Rodríguez, J.M., Morales-Almaráz, E., Vieyra-Alberto, R. (2014). Efecto del nivel de concentrado sobre el perfil de ácidos grasos de la leche de vacas Holstein en pastoreo. Agrociencia, 48(8), 765-775. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952014000800001&script=sci_arttext.
- Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. Journal of Dairy Science, 92(10), 5199-5211. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2375>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Atlas de Riesgos Municipal de Cuautepec de Hinojosa, Hidalgo. https://cuautepechidalgo.gob.mx/wpcontent/uploads/2025/07/13016_CUAUTEPEC_HINOJOSA_2024.pdf
- Herrera, M.C., y León, S.V., Tolentino, R.G., Fernández, B.G., & González, G.D. (2006). Los ácidos grasos omega-3 y omega-6: nutrición, bioquímica y salud. Revista de educación bioquímica, 25(3), 72-79. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revedubio/reb-2006/reb063b.pdf>.

- Côrtes, C., da Silva-Kazama, D.C., Kazama, R., Gagnon, N., Benchaar, C., Santos, G.T.D., Petit, H.V. (2010). Milk composition, milk fatty acid profile, digestion, and ruminal fermentation in dairy cows fed whole flaxseed and calcium salts of flaxseed oil. *Journal of Dairy Science*, 93(7), 3146-3157. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2905>.
- Ferlay, A., Martin, B., Lerch, S., Gobert, M., Pradel, P., Chilliard, Y. (2010). Effects of supplementation of maize silage diets with extruded linseed, vitamin E and plant extracts rich in polyphenols, and morning v. evening milking on milk fatty acid profiles in Holstein and Montbéliarde cows. *Animal*, 4(4), 627-640. <https://doi.org/10.1017/S1751731109991224>.
- Gao, Y., Sun, T., & Li, J. (2009). Effect of oilseeds rich in linoleic and linolenic acids on milk production and milk fatty acid composition in dairy cows. *Frontiers of Agriculture in China*, 3, 311-318. <https://doi.org/10.1007/s11703-009-0022-1>.
- García, C., Montiel, R. L. A., & Borderas, T. F. (2014). Grasa y proteína de la leche de vaca: componentes, síntesis y modificación. *Archivos de zootecnia*, 63, 85-105. <https://doi.org/10.21071/az.v63i241.592>.
- Gómez Agudelo, D., Bedoya Mejía, O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. Corporacion Universitaria Lasallista. <https://hdl.handle.net/10495/31684>
- Gómez-Cortés, P., de la Fuente, M. Á., & Juárez, M. (2019). Ácidos grasos *trans* y ácido linoleico conjugado en alimentos: origen y propiedades biológicas. *Nutrición Hospitalaria*, 36(2), 479-486. <https://dx.doi.org/10.20960/nh.2466>
- Goulding, D. A., Fox, P. F., & O'Mahony, J. A. (2020). Milk proteins: An overview. *Milk proteins*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00002-5>

- Granados-Rivera, L. D., & Hernández-Mendo, O. (2018). Síndrome de depresión de grasa láctea provocado por el isómero *trans*-10, *cis*-12 del ácido linoleico conjugado en vacas lactantes. Revisión. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 9(3), 536-554. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i3.4337>
- Haro, A. M., Artacho, R., & Cabrera-Vique, C. (2006). Ácido linoleico conjugado: interés actual en nutrición humana. Medicina clínica, 127(13), 508-515. <https://doi.org/10.1157/13093270>
- Hazard T., Sergio (1997). Variación de la composición de la leche [en línea]. Temuco: Serie Carillanca. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-inia-cl-20.500.14001-32524>.
- Koba, K., & Yanagita, T. (2014). Health benefits of conjugated linoleic acid (CLA). Obesity research & clinical practice, 8(6), e525-e532. <https://doi.org/10.1016/j.orcp.2013.10.001>
- Martínez del Olmo, D. (2012). Suplementación de las raciones para vacas lecheras de alta producción con aceites de origen vegetal: rendimientos productivos y reproductivos (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid). <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/ea56722b-71ce-4cf6-b6be-84968fbfa954/content>
- Martínez Marín, A. L., Pérez Hernández, M., Pérez Alba, L. M., Carrión-Pardo, D., & Gómez-Castro, A. G. (2010). Metabolismo de los lípidos en los rumiantes. <http://hdl.handle.net/10396/8390>
- Oomah, B. D. (2001). Flaxseed as a functional food source. Journal of the Science of Food and Agriculture, 81(9), 889–894. <https://doi.org/10.1002/jsfa.898>

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (1999). NOM-062-ZOO-1999, Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203498/NOM-062-ZOO-1999_220801.pdf.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-051-ZOO-1995, Trato humanitario en la movilización de animales. Diario Oficial de la Federación. https://fmvz.unam.mx/fmvz/p_estudios/apuntes_bioet/051zoo_movilizacion.pdf
- Kennelly, P. J., Botham, K. M., McGuinness, O., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2023). Harper. Bioquímica ilustrada (32.^a ed.). McGraw-Hill.
- Plata-Pérez, G., Angeles-Hernandez, J. C., Morales-Almaráz, E., Del Razo-Rodríguez, O. E., López-González, F., Peláez-Acero, A., ... & Vieyra-Alberto, R. (2022). Oilseed supplementation improves milk composition and fatty acid profile of cow milk: a meta-analysis and meta-regression. *Animals*, 12(13), 1642. <https://doi.org/10.3390/ani12131642>.
- Requena, F. D., Agüera, E. I., & Requena, F. (2007). Genética de la caseína de la leche en el bovino Frisón. REDVET. Revista electrónica de Veterinaria, 8(1), 1-9. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63613304013.pdf>
- Revilla, A. (1982). Tecnología de la leche: procesamiento, manufactura y análisis (No. 53). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Sanhueza Catalán, J., Durán Agüero, S., & Torres García, J. (2015). Los ácidos grasos dietarios y su relación con la salud. *Nutrición Hospitalaria*, 32(3), 1362-1375. <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2015.32.3.9276>.

- Taverna, M. (2007). Composición química de la leche. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccionanimal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/leche_subproductos/63-composicion_leche.pdf
- Tedeschi, L. O., Fox, D. G., Sainz, R. D., Barioni, L. G., Medeiros, S. R. D., & Boim, C. (2005). Mathematical models in ruminant nutrition. *Scientia Agricola*, 62, 76-91. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000100015>.
- Tian, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Sun, Y., Mao, Y., Yang, Z., & Li, M. (2022). Transcriptional regulation of milk fat synthesis in dairy cattle. *Journal of Functional Foods*, 96, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105208>.
- Valenzuela Báez, R. (2020). Lácteos: nutrición y salud. Consorcio Lechero. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181877>.
- Valenzuela, A. (2008). Ácidos grasos con isomería *trans* i. Su origen y los efectos en la salud humana. Isomeric *trans* fatty acids i. Origin and effects in human health. Instituto de Nutrición y Tecnología de Alimentos, (INTA). <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182008000300001>.
- Vieyra-Alberto, R. (2017). Estrategias de alimentación con base en el pastoreo para modificar el perfil de ácidos grasos en leche (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma del Estado de México). <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65784>.
- Ortiz-Fonseca, E., & Hernández-Soto, A. (2025). Alergia a la proteína de la leche de vaca. *Revista Alergia México*, 72(4), 318-330.
- Bauman, D. E., & Griinari, J. M. (2003). *Nutritional regulation of milk fat synthesis*. **Annual Review of Nutrition**, 23, 203–227. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073408>
- Benchaa, C., Romero-Pérez, G. A., Chouinard, P. Y., Hassanat, F., Eugene, M., Petit, H. V., & Côrtes, C. (2012). Supplementation of increasing amounts of

linseed oil to dairy cows fed total mixed rations: Effects on digestion, ruminal fermentation characteristics, protozoal populations, and milk fatty acid composition. **Journal of Dairy Science**, **95**(8), 4578–4590. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5455>

Caroprese, M., Marzano, A., Marino, R., Gliatta, G., Muscio, A., & Sevi, A. (2010). Flaxseed supplementation improves fatty acid profile of cow milk. **Journal of Dairy Science**, **93**(6), 2580–2588. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-2003>

Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., & Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. **Journal of Dairy Science**, **92**(10), 5199–5211. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2375>

Côrtes, C., da Silva-Kazama, D. C., Kazama, R., Gagnon, N., Benchaar, C., Santos, G. T. D., Zeoula, L. M., & Petit, H. V. (2010). Milk composition, milk fatty acid profile, digestion, and ruminal fermentation in dairy cows fed whole flaxseed and calcium salts of flaxseed oil. **Journal of Dairy Science**, **93**(7), 3146–3157. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2905>

Glasser, F., Ferlay, A., & Chilliard, Y. (2008). Oilseed lipid supplements and fatty acid composition of cow milk: A meta-analysis. **Journal of Dairy Science**, **91**(12), 4687–4703. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-0987>

Gonthier, C., Mustafa, A. F., Ouellet, D. R., Chouinard, P. Y., Berthiaume, R., & Petit, H. V. (2005). Feeding micronized and extruded flaxseed to dairy cows: Effects on blood parameters and milk fatty acid composition. **Journal of Dairy Science**, **88**(2), 748–756. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72738-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72738-7)

Haro, A. M., Artacho Martín-Lagos, R., & Cabrera-Vique, C. (2006). Ácido linoleico conjugado: interés actual en nutrición humana. **Medicina Clínica (Barcelona)**, **127**(13), 508–515.

- Leduc, M., Létourneau-Montminy, M.-P., Gervais, R., & Chouinard, P. Y. (2017). Effect of dietary flax seed and oil on milk yield, gross composition, and fatty acid profile in dairy cows: A meta-analysis and meta-regression. **Journal of Dairy Science**, **100**(11), 8906–8927. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12637>
- Loor, J. J., Ueda, K., Ferlay, A., Chilliard, Y., & Doreau, M. (2005). Intestinal flow and digestibility of trans fatty acids and conjugated linoleic acids (CLA) in dairy cows fed a high-concentrate diet supplemented with fish oil, linseed oil, or sunflower oil. **Animal Feed Science and Technology**, **119**(3–4), 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.01.001>
- Plata-Pérez, G., et al. (2022). Oilseed supplementation improves milk composition and fatty acid profile of milk in dairy cows: A meta-analysis and meta-regression. **Animals**, **12**(13), 1642. <https://doi.org/10.3390/ani12131642>
- Akram, F., Nicot, M.-C., Juaneda, P., & Enjalbert, F. (2007). Conjugated linolenic acid (CLnA), conjugated linoleic acid (CLA) and other biohydrogenation intermediates in plasma and milk fat of cows fed raw or extruded linseed. *Animal*, **1**(6), 835–843. <https://doi.org/10.1017/S175173110700002X>
- Buccioni, A., Decandia, M., Minieri, S., Molle, G., & Cabiddu, A. (2012). Lipid metabolism in the rumen: New insights on lipolysis and biohydrogenation with an emphasis on the role of endogenous plant factors. *Animal Feed Science and Technology*, **174**(1–2), 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.02.009>
- da Silva, D. C., Santos, G. T., Branco, A. F., Damasceno, J. C., Kazama, R., Matsushita, M., Horst, J. A., dos Santos, W. B. R., & Petit, H. V. (2007). Production performance and milk composition of dairy cows fed whole or ground flaxseed with or without monensin. *Journal of Dairy Science*, **90**(6), 2928–2936. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-573>

- Hurtaud, C., Faucon, F., Couvreur, S., & Peyraud, J.-L. (2010). Linear relationship between increasing amounts of extruded linseed in dairy cow diet and milk fatty acid composition and butter properties. *Journal of Dairy Science*, 93(4), 1429–1443. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2839>
- Oeffner, S. P., Qu, Y., Just, J., Quezada, N., Ramsing, E., Keller, M., Cherian, G., Goddick, L., & Bobe, G. (2013). Effect of flaxseed supplementation rate and processing on the production, fatty acid profile, and texture of milk, butter, and cheese. *Journal of Dairy Science*, 96(2), 1177–1188. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5941>
- Palmquist, D. L., & Jenkins, T. C. (2003). Challenges with fats and fatty acid methods. *Journal of Animal Science*, 81(12), 3250–3254. <https://doi.org/10.2527/2003.81123250x>
- Jenkins, T. C. (1993). Lipid metabolism in the rumen. *Journal of Dairy Science*, 76(12), 3851–3863.
- Palmquist, D. L., & Jenkins, T. C. (2017). A 100-Year Review: Fat feeding of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10061–10077. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12924>

XI. ANEXOS







PERFIL LIPÍDICO DE VACAS PRIMÍPARAS EN ESTABULACIÓN ALIMENTADAS CON SEMILLA DE LINAZA MOLIDA

***Díaz-Xelhuantzi A.¹, Álvarez-Ordaz S.A.¹, Mejía-Méndez J.L.³, Morales-Almaráz E.⁴, Muñoz-Benítez A.L.¹,
Ángeles-Hernández J.C.², *Vieyra-Alberto R.¹.**

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Avenida universidad km 1 s/n. Exhacienda Aquetzalpa, Tulancingo de Bravo, 43600, Hidalgo, México. rodolfo_vieyra@uaeh.edu.mx. (01)5574466742. Modalidad: Cartel. Área: Nutrición.

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Departamento de Medicina y Zootecnia de Rumiantes, Av. Universidad 3000, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

³Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México Texcoco km 36.4, Montecillo 56264, México.

⁴Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca C.P. 50090, Estado de México, México.

Resumen.

El nivel de inclusión de semilla de linaza modifica el rendimiento y componentes de la leche. El objetivo de esta investigación fue evaluar el rendimiento lechero y el perfil lipídico de la leche con la inclusión de 3% de semilla molida de linaza en la dieta de vacas. Se utilizaron 12 vacas Holstein, primíparas, en el segundo tercio de lactación, con una producción promedio de leche de 30.6 litros al día. Se utilizaron dietas iso energéticas e iso proteicas con o sin la inclusión de linaza. En un intervalo de cinco días, a cada vaca se le registró la producción láctea y se recolectó una muestra de leche de 50 ml, en ambos ordeños. Los ésteres metílicos de los ácidos grasos fueron separados y cuantificados por cromatografía de gases (Perkin Elmer), con una columna capilar de 100 m x 0.25 mm x 0.2 µm (SUPELCO TM-2560), utilizando nitrógeno como gas acarreador. Se utilizó un diseño completamente al azar con medidas repetidas a través del tiempo. La inclusión de linaza molida no afectó ($P>0.05$) el rendimiento productivo. Se aumentó el contenido del ácido graso linolénico con la inclusión de semilla de linaza ($P<0.05$). Se modificaron algunos ácidos grasos de cadena larga a través del tiempo ($P<0.05$). Se concluye que incluir 3% de linaza molida en la dieta de vacas primíparas en producción no afecta su comportamiento productivo pero si puede ser viable para mejorar el perfil lipídico de la leche de vacas primíparas en completa estabulación.

Introducción.

La grasa de la leche se puede considerar el componente más valioso de este producto, mucho tiempo se utilizó para determinar su calidad nutritiva, organoléptica, reologica y en muchos casos su rendimiento quesero. Los lípidos de la leche son complejos y se pueden clasificar desde el punto de vista alimenticio en triacilglicéridos, fosfolípidos, glucolípidos y ésteres del colesterol (Martínez del Olmo, 2012). La grasa constituye aproximadamente el 3% de la leche, se encuentra emulsionada o suspendida en glóbulos de 0.10 a 0.22 micrones de diámetro rodeados de una capa de fosfolípidos que evitan que la grasa se aglutine y pueda separarse de la parte acuosa (Barca, 2016). La mayor parte de la grasa (98%) está constituida por triacilglicéridos y se ha identificado la presencia de 150 ácidos grasos dentro de los que destacan los ácidos linoleico y linolénico que son indispensables ya que el cuerpo humano no tiene la capacidad de sintetizarlos (Taverna, 2007). Aproximadamente entre el 17 % y el 45 % de la grasa presente en la leche se sintetiza a partir del acetato, mientras que entre el 8 % y el 25 % se origina del butirato, ambos considerados metabolitos precursores clave en la biosíntesis lipídica (Vieyra, 2017).

Los ácidos grasos se clasifican por la longitud de su cadena de carbonos en cortos hasta 6 carbonos, medianos de 8 a 16 y largos de 18 o más carbonos. También pueden clasificarse de acuerdo a su insaturación

en saturados e insaturados si es que poseen o no un doble enlace (dienos) y dependiendo la cantidad de dobles enlaces podrían ser monoinsaturados o poliinsaturados (Plata, 2023).

El estudio de los ácidos grasos presentes en la fracción lipídica representa un criterio esencial en la evaluación de la calidad de la leche, debido a que estos lípidos influyen directamente en sus propiedades fisicoquímicas y en su valor nutricional (Alvear, 2021). Los lípidos en la leche pueden formarse de la alimentación y de la actividad bacteriana en el rumen (García et al., 2014).

El perfil lipídico de la leche es el resultado de variables intrínsecas como tipo racial del animal, edad, etapa de lactancia, estado fisiológico, etc y variables extrínsecas como el ambiente y la nutrición. La fracción lipídica es el componente más susceptible a los cambios en su composición química. Así podemos modificarlo de acuerdo a las necesidades del consumidor (García et al., 2014 y Ferlay et al., 2013). Los microorganismos ruminales modifican el perfil de los ácidos grasos de la dieta mediante la isomerización y la biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados (Cortes et al., 2010). Así, la suplementación en la dieta con semillas oleaginosas ricas en ácidos grasos poliinsaturados ayudan a disminuir los ácidos grasos saturados y a incrementar en la leche los ácidos grasos benéficos al consumidor como el oléico, linoleico y linolénico. De manera general, la grasa de la leche se compone aproximadamente del 70% de ácidos grasos saturados 25% de ácidos grasos monoinsaturados y 5% de ácidos grasos poliinsaturados (Angulo et al, 2009).

Chilliard et al. (2009) mencionan que algunos de los beneficios de la inclusión de semillas oleaginosas con alto contenido de ácido graso linolénico en la dieta de vacas lecheras son el incremento de la concentración de ácido linoleico conjugado (CLA) en la leche a la vez que reduce el contenido de ácidos grasos saturados y la disminución de las emisiones diarias de metano (CH_4). De acuerdo con Gao et al. (2009) la proporción de ácidos grasos insaturados aumenta hasta en un 40%. Ambos autores concluyen que éste efecto se ve potenciado particularmente cuando dichas fuentes lipídicas se incorporan en dietas con un elevado nivel de concentrado o en aquellas basadas en ensilaje de maíz. Existe una relación importante entre el contenido de los ácidos grasos de cadena larga que se encuentran en los ingredientes de las dietas de vacas en producción y la concentración de biomoléculas funcionales que se encuentran en la leche (Plata, 2023). Esta estrecha relación ha permitido el desarrollo de estrategias encaminadas a incrementar la síntesis del ácido graso vaccénico que mediante la desaturación en la glándula mamaria es transformado en CLA. La síntesis endógena de CLA ocurre por la intervención de la enzima $\Delta 9$ desaturasa, la cual es considerada la principal vía para incrementar el CLA en leche (Bauman et al., 1999).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación evaluar el rendimiento lechero y el perfil lipídico de la leche con la inclusión de 3% de semilla molida de linaza en la dieta de vacas primíparas en un sistema de completa estabulación.

Material y Métodos.

El trabajo experimental y recolección de muestras se realizaron en una unidad de producción lechera de tipo comercial, ubicada en el Valle de Tulancingo, Hidalgo, México. Siguiendo los procedimientos marcados en las regulaciones de bienestar animal y manejo de animales experimentales descritas en la NOM-062-ZOO-1999 y NOM-051-ZOO-1995.

El tamaño de muestra fue determinado mediante el programa G-Power de la Universidad de Düsseldorf, los datos que se incluyeron fueron: 10 mediciones, 2 tratamientos, 0.05 como valor de α , con un tamaño de efecto de 1.28 para el CLA del estudio de Plata-Pérez et al. (2022) en el cual mostraron el meta-análisis del efecto de las semillas de oleaginosas en vacas lecheras en estabulación. Los resultados indicaron que con 12 animales se tiene una potencia cercana al 0.90.

Se utilizaron 12 vacas Holstein en estabulación, primíparas, en el segundo tercio de lactación, con una producción promedio de leche de 30.6 litros al día. Las vacas fueron asignadas de manera aleatoria en uno de los tratamientos: 1) Testigo = dieta completa mezclada; 2) Linaza = dieta completa mezclada con la inclusión

de 3 % sobre la materia seca de semilla molida de linaza. El balanceo de dietas completas mezcladas se realizó con el programa Dairy NRC versión 1.1.10 (<https://nutritionmodels.com>) con 17.25 % de proteína cruda y 3.48 Mcal de energía digestible por kg de materia seca.

El diseño experimental fue completamente al azar con mediciones repetidas. Los efectos fijos a evaluar fueron las dietas experimentales (Testigo y Linaza), los días de medición (-5d, 0d, 5d, 10d, 15d, 20d, 25d, 30d, 35d y 40d) y su interacción, y el factor aleatorio fue la vaca.

En los comederos se proporcionó 5% más del consumo máximo calculado para vacas con estas características, dividido en dos ocasiones al día. El consumo de TMR se midió por diferencia entre oferta y rechazo. En todo momento se tuvo disponibilidad de agua de bebida.

En cada medición, se registró la producción de leche de ambos ordeños para obtener una alícuota de 50 ml por vaca y día. Para conocer su perfil lipídico, a los tubos con leche se realizó la extracción de la grasa de acuerdo con la técnica descrita por Feng et al. (2004), la metilación de la muestra se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Christie (1982) con modificaciones de Chouinard et al. (1999). Los ésteres metílicos de los ácidos grasos fueron separados y cuantificados por cromatografía de gases (Perkin Elmer), con una columna capilar de 100 m x 0.25 mm x 0.2 µm (SUPELCO TM-2560), utilizando nitrógeno como gas acarreador. El detector e inyector se mantuvieron a 260°C, la temperatura inicial del horno fue de 140°C por cinco minutos, aumentando 4°C por minuto hasta llegar a 240°C. Cada pico se identificó de acuerdo con los tiempos de retención de estándares de ésteres metílicos (Supelco 37 FAME MIX). Los ácidos grasos se reportan en g por 100 g del total de ácidos grasos.

Los datos obtenidos de rendimiento productivo y la composición química de la leche se analizaron con el procedimiento MIXED de SAS (2002), utilizando el modelo mixto siguiente: $Y_{ijk} = \mu + T_i + D_j + (T \times D)_{ij} + E_{ijk}$, donde la variable respuesta (Y_{ijk}) depende de la suma de la media general (μ), del tratamiento (T_i), del día de muestreo (D_j), de la interacción $((T \times D)_{ij})$ y del error residual (E_{ijk}). Se consideró una significancia <0.05 , en donde hubo diferencia se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de medias.

Resultados.

El Cuadro 1 muestra el perfil lipídico de la leche de vacas Holstein de primer parto en completa estabulación que se incluyó en la dieta semilla de linaza molida.

No hubo diferencia ($P>0.05$) en la producción de leche cuando a las vacas se le incluye semilla de linaza molida en la dieta. Así mismo, no se observaron diferencias ($P>0.05$) en la mayoría de los ácidos grasos. El contenido del ácido graso linolénico fue superior en la leche de vacas alimentadas con esta oleaginosa ($P<0.05$).

Cuadro 1. Perfil lipídico de la leche de vacas Holstein primíparas en estabulación alimentadas con semilla de Linaza molida

Item	Tratamiento		EEM	P<
	Testigo	Linaza		
Rendimiento de leche, kg/día	28.4	28.8	0.7321	0.6620
Ácidos grasos, g/100 g AG				
Butírico	3.05	3.22	0.2001	0.5461
Caproico	2.23	2.30	0.1116	0.6317
Caprílico	1.17	1.29	0.0701	0.2233
Capríco	2.67	2.85	0.1584	0.4308
Undecanoico	0.27	0.27	0.0163	0.9145
Laurico	2.90	2.97	0.1169	0.6761
Tridecanoico	0.18	0.17	0.0110	0.7405
Mirístico	10.57	10.76	0.2996	0.6522

Miristoleico	0.42	0.49	0.0616	0.4226
Pentadecanoico	0.55	0.50	0.0554	0.4997
Palmitico	29.93	28.14	0.7032	0.0924
Heptadecanoico	0.43	0.38	0.0208	0.1023
Esteárico	7.84	7.27	0.4136	0.3410
Vaccénico	1.78	2.08	0.1919	0.2788
Oléico	29.46	31.20	0.8683	0.1755
Linoleico	2.20	2.09	0.1158	0.5137
Linolénico	0.03 ^a	0.02 ^a	0.0029	0.0388
CLA	0.95	1.00	0.0660	0.5833
Otros	1.46	1.33	0.1344	0.5265

^a: literales diferentes en la misma hilera son estadísticamente distintos ($P < 0.05$). EEM: Error estándar de la media. Tratamiento: 1) Testigo = dieta completa mezclada; 2) Linaza = dieta completa mezclada con la inclusión de 3 % sobre la materia seca de semilla molida de linaza.

Conclusión.

En donde las condiciones agroclimáticas y de rentabilidad lo permitan, el uso de 3% de semilla de linaza molida puede ser una opción viable como ingrediente en la dieta de vacas altas productoras ya que no afectan el rendimiento productivo y si mejora el perfil lipídico de la leche teniendo una vía más para la ingesta de estos ácidos grasos benéficos al consumidor.

Literatura citada.

Alvear, D. C., Guerrero, J. D., Bonifaz, N. F., & Noriega, P. F. (2021). Calidad composicional y concentración de ácidos grasos omega-3 (alfa-linolénico) y omega-6 (linoleico) presentes en leche bovina de tres regiones naturales del Ecuador. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 68(2), 150-169.

Angulo, J., Mahecha, L., & Olivera, M. (2009). Síntesis, composición y modificación de la grasa de la leche bovina: Un nutriente valioso para la salud humana. *Revista MVZ Córdoba*, 14(3), 1856-1866. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012202682009000300010&script=sci_arttext

Barca Tarigo, J., Meikle, A., Chilbroste, P., Carriquiry, M., & Olazabal, L. (2016). Perfil de ácidos grasos en leche de vacas alimentadas en base a dieta totalmente mezclada combinadas o no con diferentes tiempos de pastor.

Bauman, D. E., Baumgard, L. H., Corl, B. A. y Grinari, J. M. 1999. Biosynthesis of conjugated linoleic acid in ruminants. *Proceedings of the American Society of Animal Science*, 1-15.

Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., & Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. *Journal of Dairy Science*, 92(10), 5199-5211.

Chouinard, P. Y., Louise, C., Barbano, D. M., Metzger, L. E. y Bauman, D. E. 1999. Conjugated linoleic acids alter milk fatty acid composition and inhibit milk fat secretion in dairy cows. *Journal Animal Physiology Animal Nutrition*. 129: 1579-1584.

Côrtes, C., da Silva-Kazama, D. C., Kazama, R., Gagnon, N., Benchaar, C., Santos, G. T. D., ... & Petit, H. V. (2010). Milk composition, milk fatty acid profile, digestion, and ruminal fermentation in dairy cows fed whole flaxseed and calcium salts of flaxseed oil. *Journal of Dairy Science*, 93(7), 3146-3157.

Feng, S., Lock, A. L. y Garnsworthy, P. C. 2004. Technical note: A rapid lipid separation method for determining fatty acid composition of milk, *Journal of Dairy Science*, 87: 3785-3788.

Ferlay, A., Martin, B., Lerch, S., Gobert, M., Pradel, P., & Chilliard, Y. (2010). Effects of supplementation of maize silage diets with extruded linseed, vitamin E and plant extracts rich in polyphenols, and morning v. evening milking on milk fatty acid profiles in Holstein and Montbéliarde cows. *Animal*, 4(4), 627-640.

Gao, Y., Sun, T., & Li, J. (2009). Effect of oilseeds rich in linoleic and linolenic acids on milk production and milk fatty acid composition in dairy cows. *Frontiers of Agriculture in China*, 3, 311-318.

García, C., Montiel, R. L. A., & Borderas, T. F. (2014). Grasa y proteína de la leche de vaca: componentes, síntesis y modificación. *Archivos de zootecnia*, 63, 85-105. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5959666>

Martínez del Olmo, D. (2012). Suplementación de las raciones para vacas lecheras de alta producción con aceites de origen vegetal: rendimientos productivos y reproductivos (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid). <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/ea56722b-71ce-4cf6-b6be-84968fbfa954/content>

Plata-Pérez, G., Angeles-Hernandez, J. C., Morales-Almaráz, E., Del Razo-Rodríguez, O. E., López-González, F., Peláez-Acero, A., ... & Vieyra-Alberto, R. (2022). Oilseed supplementation improves milk composition and fatty acid profile of cow milk: a meta-analysis and meta-regression. *Animals*, 12(13), 1642.

Taverna, M. (2007). Composición química de la leche. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccionanimal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/leche_subproductos/63-composicion_leche.pdf.