

Suplementación de bovinos lecheros con ácidos grasos omega sobre la función reproductiva y productiva

Supplementation of dairy cattle with omega fatty acids on reproductive and productive function

Jessica María Flores-Salas¹ , Carlos Iván Ramírez-Torres² , Edir Torres-Rodríguez¹ ,
Alan Sebastián Alvarado-Espino¹ , Fernando Arellano-Rodríguez¹ , Cayetano Navarrete-Molina^{1*} 

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, CP. 27054, Torreón, Coahuila, México.

²Postgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez S/N, Valle Verde, CP. 27054, Torreón, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: navarremolina1977@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 19 de febrero 2026

Aceptado: 11 de mayo 2026

RESUMEN. La producción de leche bovina es considerada como una actividad insostenible, donde el aumento en la producción se asocia con una reducción en la eficiencia reproductiva. El objetivo fue determinar el efecto de la suplementación con ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9 (SAGO3,6y9) sobre variables reproductivas y productivas. Para lo cual, sesenta vacas lecheras multíparas de un sistema de producción intensivo fueron divididas en un grupo control ($n = 30$) que recibió una ración totalmente mezclada (RTM) y un grupo tratado ($n=30$) que recibió una RTM más 150 g diarios de SAGO3,6y9 por 150 días. Un protocolo de inseminación artificial a tiempo fijo y ultrasonografía transrectal a los 31 días fue utilizado. El análisis estadístico incluyó un ANOVA, prueba U de Mann-Whitney y correlaciones entre las variables respuesta. Los resultados indicaron diferencias ($p < 0.05$) entre los grupos para las variables servicios por concepción, días abiertos y longitud del embrión. No se detectaron diferencias ($p \geq 0.05$) para las variables producción de leche y diámetro del cuerpo lúteo. Así como, una correlación significativa ($p < 0.05$) entre las variables reproductivas consideradas, a excepción del cuerpo lúteo, la cual no se correlacionó ($p \geq 0.05$) con el resto. La suplementación lipídica modifica indicadores reproductivos sin alterar el rendimiento productivo. La reducción de los días abiertos y servicios por concepción favorece la sostenibilidad del hato al disminuir gastos de producción. Por lo cual se recomienda la SAGO3,6y9 en la dieta para optimizar la fertilidad y reducir días improductivos en sistemas de lechería intensiva.

Palabras clave: Inseminación, concepción, días abiertos, lactancia

ABSTRACT. Dairy milk production is considered an unsustainable activity, where increased production is associated with reduced reproductive efficiency. The objective was to determine the effect of omega-3, omega-6, and omega-9 fatty acid supplementation (O3,6,9FAS) on reproductive and productive variables. Sixty multiparous dairy cows from an intensive production system were divided into a control group ($n = 30$) that received a total mixed ration (TMR) and a treatment group ($n = 30$) that received a TMR more 150 g daily of O3,6,9FAS for 150 days. A fixed-time artificial insemination protocol and transrectal ultrasonography at 31 days were used. Statistical analysis included ANOVA, Mann-Whitney U test, and correlations between response variables. The results indicated differences ($p < 0.05$) between the groups for the variables services per conception, days open, and embryo length. No differences ($p \geq 0.05$) were detected for milk production and corpus luteum diameter. A significant correlation ($p < 0.05$) was found among the reproductive variables considered, with the exception of the corpus luteum, which did not correlate ($p \geq 0.05$) with the others. Lipid supplementation modifies reproductive indicators without altering productive performance. Reducing open days and services per conception promotes herd sustainability by decreasing production costs. Therefore, O3,6,9FAS is recommended in the diet to optimize fertility and reduce non-productive days in intensive dairy systems.

Keywords: insemination, conception, open days, lactation.

Como citar: Flores-Salas JM, Ramírez-Torres CI, Torres-Rodríguez E, Alvarado-Espino AS, Arellano-Rodríguez F, Navarrete-Molina C, (2026) Suplementación de bovinos lecheros con ácidos grasos omega sobre la función reproductiva y productiva. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5101. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5101.

INTRODUCCIÓN

En unidades de producción animal especializadas en leche bovina, el incremento en la producción se ha asociado con una menor eficiencia reproductiva (Amma *et al.* 2024). Dado que la reproducción es un componente clave para la estabilidad del hato, esta correlación constituye una limitación relevante para los sistemas intensivos (Deka *et al.* 2021). La reducción de los parámetros reproductivos responde a múltiples factores vinculados al ambiente, manejo, genotipo y estado fisiológico del animal (Sitko *et al.* 2024). En vacas de alta producción, la elevada carga metabólica del periodo de transición y el balance energético negativo asociado inducen ajustes endocrinos que retrasan el reinicio de la función reproductiva posparto (Civiero *et al.* 2021).

Desde un enfoque operativo, la eficiencia reproductiva se evalúa mediante indicadores que permiten cuantificar el desempeño del hato (Armengol *et al.* 2023). Entre los indicadores más utilizados destacan los días abiertos y los servicios por concepción, porque integran el desempeño reproductivo y su impacto económico en las unidades de producción (Sasaki *et al.* 2020). Ante este escenario, la nutrición se ha propuesto como una herramienta estratégica para intervenir sobre los procesos fisiológicos que regulan la función reproductiva (Sammad *et al.* 2022). En particular, las estrategias orientadas a modular el metabolismo energético han adquirido relevancia en sistemas de alta producción.

Dentro de estas estrategias, la suplementación lipídica ha despertado interés por su capacidad para incrementar la densidad energética de la dieta y por el papel funcional de los ácidos grasos (Abou-Rjeileh *et al.* 2025). Este interés se sustenta en que los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) se han vinculado con variaciones en la eficiencia reproductiva en bovinos (Sakumoto *et al.* 2022). En particular, los ácidos grasos omega-3 se han asociado con mejoras en la actividad ovárica y la supervivencia del embrión (Libera *et al.* 2020). Mientras que los omega-6 se han asociado con la síntesis de prostaglandinas, incluida la prostaglandina E2 (Bueno Cordeiro Maldonado *et al.* 2023). Por su parte, el omega-9 se ha asociado con la competencia ovocitaria y el desarrollo embrionario temprano mediante mecanismos lipoprotectores y metabólicos (Fayezi *et al.* 2018).

No obstante, la evidencia disponible indica que los efectos de la suplementación con grasa en la dieta sobre la fertilidad en vacas lecheras son variables y dependen del perfil de ácidos grasos empleado y del contexto productivo (Rodney *et al.* 2015). A pesar de la información existente sobre los efectos individuales de los ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9, la evidencia sobre su uso combinado y su impacto integrado sobre la eficiencia reproductiva en hatos especializados manejados bajo sistemas intensivos es limitada, particularmente cuando la respuesta reproductiva se evalúa mediante indicadores operativos (p. ej. días abiertos y servicios por concepción). Además, al tratarse de sistemas que operan bajo restricciones de recursos y presión por eficiencia, la valoración del desempeño reproductivo adquiere relevancia también desde una visión de sustentabilidad del sistema, al buscar un equilibrio productivo y económico con un uso responsable de insumos y recursos naturales (Navarrete-Molina *et al.* 2019). Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que la suplementación con una mezcla de ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9 reduce el número de servicios por concepción y los días abiertos, y se asocia con un mayor desarrollo embrionario en vacas Holstein-Friesian bajo manejo intensivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

El estudio se llevó a cabo en un hato lechero comercial ubicado en el municipio de Gómez Palacio, en la región Lagunera del estado de Durango, México. La unidad de producción se localiza en las coordenadas 25°66'0" LN y 103°58'0" LO, a una altitud de 1 126 m. La recolección de datos se realizó durante el periodo del 01 de agosto al 31 de diciembre del 2025. La región se caracteriza por una temperatura promedio anual de 22 °C y una precipitación aproximada de 200 mm, concentrada principalmente durante la temporada de verano (INIFAP 2023).

Unidades experimentales

Para la realización del estudio se utilizaron 60 vacas Holstein-Friesian multíparas, con un promedio de 20 ± 5 días en leche (DEL) al inicio del experimento. Los animales fueron alojados en corrales con acceso a áreas de sombra, cama de arena y agua a libre acceso. El ordeño se realizó tres veces al día, con intervalos aproximados de ocho horas entre ordeñas. La alimentación consistió en una ración total mezclada (RTM) ofrecida dos veces al día, formulada para cubrir y exceder los requerimientos nutricionales mínimos de vacas lecheras en producción. Las vacas se asignaron de manera secuencial mediante asignación alternada 1:1 al momento de su inclusión en el estudio, conformándose dos grupos experimentales. El grupo control (GC; $n = 30$) fue alimentado exclusivamente con la RTM, sin adición del suplemento evaluado en este estudio. El grupo tratado (GT; $n = 30$) recibió una suplementación diaria de 150 g animal⁻¹ de Zeogain Potentia® durante un periodo de 150 días. El suplemento se pesó individualmente para cada animal y se mezcló manualmente con una fracción de la RTM, la cual fue ofrecida en recipientes individuales inmediatamente después de la primera ordeña del día, asegurando el consumo completo del suplemento antes de la oferta del resto de la ración. La cantidad de suplemento ofrecida aportaba 10.38 g de omega-3, 80.46 g de omega-6 y 26.91 g de omega-9 diariamente.

Manejo reproductivo

El manejo reproductivo se realizó mediante un protocolo de inseminación artificial a tiempo fijo. Al primer servicio, todas las vacas incluidas en el estudio fueron sometidas a un esquema Doble Ovsynch (Souza *et al.* 2008). El periodo voluntario de espera a primer servicio fue de 66 DEL. La gestación se diagnosticó mediante ultrasonografía transrectal a los 31 días posteriores a la inseminación, utilizando un ultrasonido veterinario Draminski iScan mini® con transductor lineal de 7.5 MHz. Este procedimiento incluyó la medida del embrión (mm) y del cuerpo lúteo (mm). Las vacas diagnosticadas como no preñadas en esta evaluación se resincronizaron para un servicio subsecuente mediante un protocolo Ovsynch convencional (Pursley *et al.* 1995) y, tras la resincronización, se realizó una nueva inseminación artificial a tiempo fijo conforme al protocolo aplicado.

Obtención y análisis de datos

Los valores de las variables analizadas se obtuvieron a partir de los registros de la unidad de producción mediante el software de gestión para hatos lecheros Afifarm® versión 5.5 (Afimilk 2022). La variable independiente correspondió al tratamiento nutricional, definido por la inclusión

o no del suplemento en la RTM. Las variables de respuesta se agruparon en reproductivas: servicios por concepción (NINS) y días abiertos (DAB); productivas: número de lactancia (LACT), días útiles de ordeño acumulados (DUTIL) y producción promedio (PRODP); y reproductivas complementarias: longitud del embrión (LONGEMB) y diámetro del cuerpo lúteo (DIAMCL). Previo al análisis, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Para las variables que cumplieron estos supuestos, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y, tras detectar efectos del tratamiento, se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Por su parte, LONGEMB y DIAMCL se evaluaron mediante la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. Finalmente, la asociación entre las variables se estimó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) para los datos con distribución normal, y el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) para las relaciones que involucraron LONGEMB y DIAMCL. Todos los análisis se realizaron con el software Minitab® versión 20.4 (Minitab 2021).

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta las medias de las variables reproductivas y productivas evaluadas en los grupos GC y GT. El ANOVA mostró que el tratamiento tuvo un efecto significativo sobre las variables reproductivas. En particular, NINS fue menor en el GT en comparación con el GC ($p = 0.001$). De manera similar, DAB fueron significativamente menores en el GT respecto al GC ($p < 0.001$), lo que indica un mejor desempeño reproductivo en las vacas suplementadas. En contraste, para LACT, DUTIL y PRODP no se detectaron diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$).

Tabla 1. Media $\pm$ error estándar de la suplementación con omega 3, 6 y 9 sobre variables reproductivas y productivas en vacas lecheras Holstein-Friesian en sistema de producción intensivo en el norte de México (25° N).

Variable	Grupo		Valor p
	Control (n=30)	Tratado (n=30)	
Servicios por concepción, (n)	2.73 $\pm$ 0.16 ^a	1.97 $\pm$ 0.16 ^b	0.001
Días abiertos, (n)	107.63 $\pm$ 2.75 ^a	91.53 $\pm$ 2.75 ^b	< 0.001
Lactancia, (n)	2.50 $\pm$ 0.16 ^a	2.47 $\pm$ 0.16 ^a	0.884
Días útiles de ordeño acumulados, (n)	771.60 $\pm$ 66.20 ^a	745.90 $\pm$ 66.20 ^a	0.785
Producción promedio, (kg d ⁻¹)	40.73 $\pm$ 1.88 ^a	41.78 $\pm$ 1.88 ^a	0.694

^{a,b} Medias con distinta literal dentro de una misma fila difieren estadísticamente ($p < 0.05$).

Respecto a las variables de respuesta reproductivas complementarias incluidas (Tabla 2), se determinó que la longitud de embrión difirió entre grupos, con valores mayores en el GT ($p = 0.042$). En cambio, el diámetro de cuerpo lúteo no mostró diferencias entre tratamientos ($p = 0.877$). Considerando que estas variables presentaron distribución no paramétrica, se reporta la media $\pm$ el error estándar con fines comparativos; sin embargo, la significancia se determinó mediante el estadístico W de la prueba U de Mann-Whitney.

Tabla 2. Media $\pm$ error estándar de la suplementación con omega 3, 6 y 9 sobre variables sobre variables reproductivas complementarias en lecheras Holstein-Friesian en sistema de producción intensivo en el norte de México (25° N).

Variable	Grupo		Valor W	Valor p
	Control (n=30)	Tratado (n=30)		
Longitud de embrión, (mm)	11.41 $\pm$ 0.14	12.02 $\pm$ 0.18	777.00	0.042
Diámetro de cuerpo lúteo, (mm)	24.89 $\pm$ 0.53	25.23 $\pm$ 0.82	904.00	0.877

El análisis de correlación de Pearson (Tabla 3) evidenció una asociación positiva entre NINS y DAB ($r = 0.702$, $p = 0.000$), lo que sugiere que un mayor número de servicios por concepción se relaciona con un incremento en los días abiertos. Además, se observaron asociaciones positivas entre longitud del embrión y DAB ($r = 0.598$, $p = 0.000$), así como entre longitud del embrión y NINS ($r = 0.380$, $p = 0.003$). En relación con el grupo experimental, se identificaron correlaciones negativas con NINS ($r = -0.405$, $p = 0.001$) y DAB ($r = -0.477$, $p = 0.000$), y una correlación positiva con longitud del embrión ($r = 0.324$, $p = 0.012$). En contraste, diámetro del cuerpo lúteo no mostró asociaciones con las variables reproductivas evaluadas ($p > 0.05$).

Tabla 3. Matriz de correlación para variables reproductivas y reproductivas respecto a la suplementación con omega 3, 6 y 9 en lecheras Holstein-Friesian en sistema de producción intensivo en el norte de México (25° N).

	Grupo experimental	Servicios por concepción (n)	Días abiertos (n)	Longitud del embrión (mm)	Diámetro del cuerpo lúteo (mm)
Grupo experimental	1				
Servicios por concepción (n)	-0.405 0.001	1			
Días abiertos (n)	-0.477 0.000	0.702 0.000	1		
Longitud del embrión (mm)	0.324 0.012	0.380 0.003	0.598 0.000	1	
Diámetro del cuerpo lúteo (mm)	0.045 0.731	0.119 0.363	0.012 0.928	0.042 0.748	1

DISCUSIÓN

La hipótesis de inicio propuso que la suplementación con ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9 reduce el número de servicios por concepción y los días abiertos, así como un mayor desarrollo embrionario en vacas Holstein-Friesian bajo manejo intensivo. En este sentido, los resultados sugieren que la suplementación con lípidos funcionales mejora el desempeño reproductivo, por lo cual no se rechaza la hipótesis inicial planteada. Asimismo, los resultados evidencian que este tipo de suplementación puede contribuir a un entorno más estable para eventos periovulatorios y postinseminación, sin que necesariamente se traduzca en cambios productivos (Tabla 1). Este comportamiento es consistente con reportes en sistemas intensivos, donde la inclusión de ácidos grasos funcionales, en especial ácidos grasos poliinsaturados con participación de omega-3, se asocia con mejoras reproductivas sin una respuesta productiva

consistente; además, en varios de esos enfoques el aporte contempla fracciones de omega-3 y omega-6, por lo que la respuesta parece estar influida por el perfil lipídico de la mezcla más que por un solo omega (Castro *et al.* 2019, dos Santos Silva *et al.* 2024). Bajo este marco, y considerando el estado fisiológico y metabólico del posparto, la interpretación de la respuesta reproductiva se relaciona con la disponibilidad de lípidos bioactivos para los tejidos reproductivos.

Por otro lado, estos efectos pueden explicarse por la interacción entre el metabolismo lipídico y la función ovárica. En células de la granulosa bovina, concentraciones elevadas de ácidos grasos no esterificados inducen estrés oxidativo y apoptosis, con efectos sobre la esteroidogénesis y la competencia ovocitaria, determinantes de la concepción por servicio (Zhou *et al.* 2022; Lei *et al.* 2023). También se ha descrito que el ácido graso omega-9 puede modular la expresión génica y el fenotipo funcional de las células de la granulosa, lo que refuerza el papel del microambiente lipídico en la respuesta reproductiva (Yenuganti y Vanselow 2017; Tao *et al.* 2024). En ese sentido, la contribución de la fracción omega-6 se interpreta como parte del perfil de AGPI que configura dicho microambiente y su variación en el posparto, sin atribuir el efecto a una sola fracción. En este contexto, los resultados evidenciaron que la LONGEMB fue diferente para el GC vs GT con 11.41 ± 0.14 mm vs 12.02 ± 0.18 mm ($p = 0.042$), mientras que DIAMCL no difirió entre tratamientos ($p = 0.877$) (Tabla 2). La ausencia de diferencias en DIAMCL es consistente con investigaciones previas en vacas Holstein lactantes, donde la suplementación lipídica no modificó el tamaño luteal (Roskopf *et al.* 2025).

La disminución de los servicios por concepción sugiere una mayor eficiencia al servicio (Tabla 1). En concordancia, la correlación positiva observada entre servicios por concepción y días abiertos ($r = 0.702$, $p < 0.001$) indica una asociación consistente entre ambos indicadores, de modo que una reducción de servicios repetidos se asocia con una preñez más temprana (Tabla 3). Aun así, la literatura no describe una respuesta única; la magnitud del efecto suele variar según el perfil de ácidos grasos, la forma de suministro y la ventana fisiológica de aplicación, factores que determinan la disponibilidad de lípidos bioactivos y su participación en procesos reproductivos (Manriquez *et al.* 2019, Dawod *et al.* 2020). El estado metabólico del posparto también modifica la dinámica folicular y la probabilidad de concepción por servicio, lo que contribuye a explicar diferencias entre estudios y hatos (Crowe *et al.* 2018, Martens 2023).

La reducción evidenciada en los días abiertos es coherente con la mejora en eficiencia al servicio (Tabla 1), dado que ambos indicadores reflejan etapas distintas de un mismo proceso y tienden a asociarse en sistemas intensivos (Durán-Alvarez *et al.* 2023). En este estudio, la diferencia entre grupos fue de 16.10 días abiertos y, en la misma dirección, los servicios por concepción fueron menores en el GT respecto al GC (Tabla 1). En vacas Holstein se han reportado reducciones de los días abiertos asociadas con suplementación omega-3, complementadas con mejoras en la eficiencia al servicio (Hadadi *et al.* 2021). Otras investigaciones señalan que el estado metabólico e inflamatorio del periodo de transición condiciona el reinicio reproductivo y puede prolongar los días abiertos; por ello, se ha propuesto que estrategias nutricionales orientadas a modular esos mecanismos favorecen concepciones más tempranas y reducen servicios repetidos, como el uso de suplementos con ácidos grasos (Wankhade *et al.* 2017, Bionaz *et al.* 2020, Zeng *et al.* 2023).

En sistemas intensivos, una mejora en servicios por concepción y días abiertos suele asociarse con un efecto económico en el corto plazo, al reducir repeticiones de inseminación y, con ello, eventos de manejo e insumos asociados, además de acortar el periodo abierto (Wicaksono *et al.* 2024). Cuando la concepción falla en servicios tempranos, se prolonga el tiempo para alcanzar la preñez y se acumulan intentos, lo cual provoca pérdidas económicas cuantificables en condiciones comerciales (Hamid *et al.* 2021). A escala de hato, análisis económicos bajo manejo intensivo muestran que elevar la tasa de preñez mejora el resultado económico anual, aunque la magnitud depende del escenario productivo y de precios (Ríos-Mohar *et al.* 2022). Adicionalmente, algunos modelos de simulación indican que la tasa de preñez condiciona el retorno anual, así como decisiones ligadas al uso de semen y reemplazos, por lo que el valor de concepciones más tempranas se mantiene como una variable importante en distintos escenarios (Lauber *et al.* 2026).

Sin embargo, resulta necesario discutir que estos beneficios económicos no se observan al momento de proporcionar la suplementación, sino que se relacionan con la disminución de los días improductivos de la vaca. En este sentido, la producción promedio fue similar entre grupos, así como los días útiles de ordeño acumulados ($p > 0.05$). Lo anterior es consistente con otras investigaciones al reportar que, cuando la dieta basal cubre requerimientos, la respuesta productiva a la suplementación con grasa suele ser inconsistente; en esos casos, la señal puede concentrarse en variables reproductivas (Ariza *et al.* 2019, Frank *et al.* 2022, Plata-Pérez *et al.* 2022). En ese sentido, el principal aporte del tratamiento pudiera estar relacionado con su impacto en eficiencia reproductiva, más que con modificaciones en producción. Al reducir el intervalo improductivo, la mejora reproductiva incrementa la eficiencia del hato y, con producción estable, se asocia con un uso más eficiente de los recursos y una menor carga ambiental por unidad de producto (Tadesse *et al.* 2022).

CONCLUSIONES

La suplementación con ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9 mejora la eficiencia reproductiva de vacas lecheras Holstein-Friesian bajo sistemas de producción intensiva en México, principalmente al reducir tanto los días abiertos como el número de servicios por concepción. Adicionalmente, los animales suplementados, muestran un mayor desarrollo embrionario, sin embargo, no se detectaron diferencias significativas en el volumen de producción láctea. En este sentido, la nutrición lipídica emerge como una herramienta estratégica para optimizar la fertilidad sin alterar el rendimiento productivo. Esta intervención nutricional favorece la sustentabilidad del hato lechero al disminuir los periodos improductivos y los costos asociados al manejo reproductivo.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación - México por la beca otorgada al M.V.Z. Carlos Iván Ramírez-Torres para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – Unidad Laguna, Tlaxiaco, Coahuila, México.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abou-Rjeileh U, Gouveia K, Lock AL, Contreras GA (2025) Graduate student literature review: Precision nutrition meets cellular insight – The mechanistic role of oleic acid in dairy cow metabolism. *Journal of Dairy Science* 108(11): 12678-12688. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26922>
- Amma Z, Reiczigel J, Fébel H, Solti L (2024) Relationship between milk yield and reproductive parameters on three Hungarian dairy farms. *Veterinary Sciences* 11(5): 218. <https://doi.org/10.3390/vetsci11050218>
- Ariza JM, Meignan T, Madouasse A, Beaudeau F, Bareille N (2019) Effects on milk quantity and composition associated with extruded linseed supplementation to dairy cow diets. *Scientific Reports* 9: 17563. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54193-z>
- Armengol R, Fraile L, Bach A (2023) Key performance indicators used by dairy consultants during the evaluation of reproductive performance during routine visits. *Frontiers in Veterinary Science* 10: 1165184. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1165184>
- Bionaz M, Vargas-Bello-Pérez E, Busato S (2020) Advances in fatty acids nutrition in dairy cows: From gut to cells and effects on performance. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 11: 110. <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00512-8>
- Bueno Cordeiro Maldonado M, de Castro Lourenço V, de Oliveira Bezerra L, Feltrin IR, Mendes AF, Rocha CC, Pugliesi G, Ealy AD, Membrive CMB, Nogueira MFG (2023) Conjugated linoleic acid supplementation changes prostaglandin concentration ratio and alters the expression of genes involved in maternal-fetal recognition from bovine trophoblast cells in vitro. *Theriogenology* 206: 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.04.003>
- Castro T, Martinez D, Isabel B, Cabezas A, Jimeno V (2019) Vegetable oils rich in polyunsaturated fatty acids supplementation of dairy cows' diets: Effects on productive and reproductive performance. *Animals* 9(5): 205. <https://doi.org/10.3390/ani9050205>
- Civiero M, Cabezas-Garcia EH, Ribeiro-Filho HMN, Gordon AW, Ferris CP (2021) Relationships between energy balance during early lactation and cow performance, blood metabolites, and fertility: A meta-analysis of individual cow data. *Journal of Dairy Science* 104(6): 7233-7251. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19607>
- Crowe MA, Hostens M, Opsomer G (2018) Reproductive management in dairy cows - The future. *Irish Veterinary Journal* 71: 1. <https://doi.org/10.1186/s13620-017-0112-y>
- Dawod A, Ahmed H, Abou-Elkhair R, Elbaz HT, Taha AE, Swelum AA, Alhidary IA, Saadeldin IM, Al-Ghadi MQ, Ba-Awadh HA, Hussein EOS, Al-Sagheer AA (2020) Effects of extruded linseed and soybean dietary supplementation on lactation performance, first-service conception rate, and mastitis incidence in Holstein dairy cows. *Animals* 10(3): 436. <https://doi.org/10.3390/ani10030436>
- Deka RP, Magnusson U, Grace D, Randolph TF, Shome R, Lindahl JF (2021) Estimates of the economic cost caused by five major reproductive problems in dairy animals in Assam and Bihar, India. *Animals* 11(11): 3116. <https://doi.org/10.3390/ani11113116>
- dos Santos Silva P, Kra G, Butenko Y, Daddam JR, Levin Y, Zachut M (2024) Maternal supplementation with n-3 fatty acids affects placental lipid metabolism, inflammation, oxidative stress, the

- endocannabinoid system, and the neonate cytokine concentrations in dairy cows. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 15: 74. <https://doi.org/10.1186/s40104-024-01033-4>
- Durán-Alvarez C, García-Ruiz A, Alonso Morales RA, Eguiarte LE, Ruiz-López FJ (2023) Parámetros, correlaciones y tendencias genéticas de caracteres reproductivos en ganado Holstein de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 14(3): 539-555. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i3.6251>
- Fayezi S, Leroy JLMR, Ghaffari Novin M, Darabi M (2018) Oleic acid in the modulation of oocyte and preimplantation embryo development. *Zygote* 26(1): 1-13. <https://doi.org/10.1017/S0967199417000582>
- Frank E, Livshitz L, Portnick Y, Kamer H, Alon T, Moallem U (2022) The effects of high-fat diets from calcium salts of palm oil on milk yields, rumen environment, and digestibility of high-yielding dairy cows fed low-forage diet. *Animals* 12(16): 2081. <https://doi.org/10.3390/ani12162081>
- Hadadi M, Alamouti AA, Alizadeh A, Mohammadi-Sangcheshmeh A (2021) A two-step feeding of calcium salts of fish oil improves reproductive performance in Holstein cows. *Spanish Journal of Agricultural Research* 19(3): e0607. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021193-17364>
- Hamid M, Abduraman S, Tadesse B (2021) Risk factors for the efficiency of artificial insemination in dairy cows and economic impact of failure of first service insemination in and around Haramaya Town, Oromia Region, Eastern Ethiopia. *Veterinary Medicine International* 2021: 6622487. <https://doi.org/10.1155/2021/6622487>
- INIFAP (2023) Reporte anual CIRNOC La Laguna 2023. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/920817/REPORTE_ANUAL_2023_La_Laguna.pdf f. Fecha de consulta: 11 de febrero de 2026
- Lauber MR, Cabrera VE, Fricke PM (2026) An economic simulation model to assess the effect of the 21-day pregnancy rate, semen type, and heifer survival rate on the optimal insemination eligibility period for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 109(1): 452-468. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27021>
- Lei Z, Ali I, Yang M, Yang C, Li Y, Li L (2023) Non-esterified fatty acid-induced apoptosis in bovine granulosa cells via ROS-activated PI3K/AKT/FoxO1 pathway. *Antioxidants* 12(2): 434. <https://doi.org/10.3390/antiox12020434>
- Libera K, Włodarek J, Warzych E, Cieślak A, Szumacher-Strabel M, Jankowiak T, Lechniak D (2020) Reproductive performance of dairy cows fed a diet supplemented with n-3 polyunsaturated fatty acids - A review. *Annals of Animal Science* 20(4): 1169-1183. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0040>
- Manriquez D, Chen L, Melendez P, Pinedo P (2019) The effect of an organic rumen-protected fat supplement on performance, metabolic status, and health of dairy cows. *BMC Veterinary Research* 15: 450. <https://doi.org/10.1186/s12917-019-2199-8>
- Martens H (2023) Increasing milk yield and negative energy balance: A Gordian knot for dairy cows? *Animals* 13(19): 3097. <https://doi.org/10.3390/ani13193097>
- Minitab (2021) Minitab Statistical Software 20.4. Minitab, LLC. State College, PA, USA. <https://www.minitab.com/>. Fecha de consulta: 11 de febrero de 2026.
- Navarrete-Molina C, Meza-Herrera CA, Ramírez-Flores JJ, Herrera-Machuca MA, Lopez-Villalobos N, Lopez-Santiago, MA, Veliz-Deras FG (2019) Economic evaluation of the environmental impact of a dairy cattle intensive production cluster under arid lands conditions. *Animal* 13(10): 2379-2387. <https://doi.org/10.1017/S175173111900048X>
- Plata-Pérez G, Angeles-Hernandez JC, Morales-Almaráz E, Del Razo-Rodríguez OE, López-González F, Peláez-Acero A, Campos-Montiel RG, Vargas-Bello-Pérez E, 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>
- Pursley JR, Mee MO, Wiltbank MC (1995) Synchronization of ovulation in dairy cows using PGF2 α and GnRH. *Theriogenology* 44(7): 915-923. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(95\)00279-H](https://doi.org/10.1016/0093-691X(95)00279-H)
- Ríos-Mohar JA, López-Díaz CA, Hernández-Cerón J, Trueta-Santiago R (2022) Economic analysis of different pregnancy rates in dairy herds under intensive management. *Veterinaria México OA* 9: 631. <https://doi.org/10.22201/fmvz.24486760e.2022.631>
- Rodney RM, Celi P, Scott W, Breinhild K, Lean IJ (2015) Effects of dietary fat on fertility of dairy cattle: A meta-analysis and meta-regression. *Journal of Dairy Science* 98(8): 5601-5620. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9528>
- Roskopf PM, Cuatrin A, Stangaferro M, Storani G, Angeli E, Hein GJ, Salado EE (2025) Effects of feeding calcium salts from a mixture of linseed and fish oil on productive response, metabolic status, and reproductive parameters in early-lactation dairy cows. *Dairy* 6(4): 34. <https://doi.org/10.3390/dairy6040034>
- Sakumoto R, Hayashi K-G, Iga K (2022) Direct effects of linoleic and linolenic acids on bovine uterine function using in vivo and in vitro studies. *Journal of Reproduction and Development* 68(1): 62-67. <https://doi.org/10.1262/jrd.2021-107>
- Sammad A, Khan MZ, Abbas Z, Hu L (2022) Major nutritional metabolic alterations influencing the reproductive system of postpartum dairy cows. *Metabolites* 12(1): 60. <https://doi.org/10.3390/metabo12010060>
- Sasaki O, Takeda H, Nishiura A (2020) The economic value of days open in Holstein cows in Japan based on simulated changes in conception rate. *Animal Science Journal* 91(1): e13342. <https://doi.org/10.1111/asj.13342>
- Sitko EM, Laplacette A, Duhatschek D, Rial C, Perez MM, Tompkins S, Kerwin AL, Giordano JO (2024) Reproductive physiological outcomes of dairy cows with different genomic merit for fertility: Biomarkers, uterine health, endocrine status, estrus features, and response to ovarian synchronization. *Journal of Dairy Science* 107(10): 8670-8687. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24376>
- Souza AH, Ayres H, Ferreira RM, Wiltbank MC (2008) A new presynchronization system (Double-Ovsynch) increases fertility at first postpartum timed AI in lactating dairy cows. *Theriogenology* 70(2): 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.03.014>
- Tadesse B, Reda AA, Kassaw NT, Tadege W (2022) Success rate of artificial insemination, reproductive performance and economic impact of failure of first service insemination: A retrospective study. *BMC Veterinary Research* 18: 226. <https://doi.org/10.1186/s12917-022-03325-1>
- Tao X, Rahimi M, Michaelis M, Görs S, Brenmoehl J, Vanselow J, Baddela VS (2024) Saturated fatty acids inhibit unsaturated fatty acid induced glucose uptake involving GLUT10 and aerobic glycolysis in bovine granulosa cells. *Scientific Reports* 14: 9888. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59883-x>
- Wankhade PR, Manimaran A, Kumaresan A, Jeyakumar S, Ramesha KP, Sejian V, Rajendran D, Varghese MR (2017) Metabolic and immunological changes in transition dairy cows: A review. *Veterinary World* 10(11): 1367-1377. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2017.1367-1377>
- Wicaksono A, Edwardes F, Steeneveld W, van den Borne BHP, Pinho P, Randi F, Hogeveen H (2024) The economic effect of cow-based reproductive management programs with a systematic use of reproductive hormones. *Journal of Dairy Science* 107(12): 11016-11035. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24109>

- Yenuganti VR, Vanselow J (2017) Oleic acid induces down-regulation of the granulosa cell identity marker FOXL2, and up-regulation of the Sertoli cell marker SOX9 in bovine granulosa cells. *Reproductive Biology and Endocrinology* 15: 57. <https://doi.org/10.1186/s12958-017-0276-z>
- Zeng XZ, Li S, Liu L, Cai S, Ye Q, Xue B, Wang X, Zhang S, Chen F, Cai C, Wang F, Zeng XF (2023) Role of functional fatty acids in modulation of reproductive potential in livestock. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 14: 24. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00818-9>
- Zhou X, Mo Z, Li Y, Huang L, Yu S, Ge L, Hu Y, Shi S, Zhang L, Wang L, Gao L, Yang G, Chu G (2022) Oleic acid reduces steroidogenesis by changing the lipid type stored in lipid droplets of ovarian granulosa cells. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 13: 27. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00660-5>