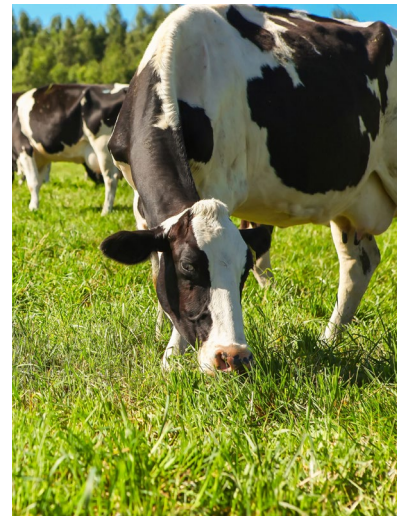




EL FUTURO SOSTENIBLE DE LA LECHE EN MÉXICO



EL FUTURO SOSTENIBLE DE LA LECHE EN MÉXICO



EL FUTURO SOSTENIBLE DE LA LECHE EN MÉXICO

Coordinadores

José Luis Dávalos Flores
Everardo González Padilla

Logística

Vianey del Toro Ríos

Danone México

Silvia Dávila
Pablo Colombo
Julio Martínez
Sofía Díaz Rivera
Paloma Serrano
Javier García

Diseño editorial

Insensato Studio

Textos

Varios autores

Corrección de estilo

Marco A. Villa Juárez

Impresión

Grupo Fogra

Fotografías

Portada, 38, 42, 70, 88, 93, 96, 114, 121, 125, 135, 170, 182, 193, 202, 260, 265, 278, 288, 306, 310 Danone de México | 28 iStock / Symbiot | 33 iStock / Dmaroscar | 44 iStock / Wckiw | 52 Unsplash / Tormius | 60 iStock / Higorwood | Pág. 66, 72 Pexels / Cottonbro Studio | 80 Pexels / Wijs (Wise) | 100 iStock / Jess311 | 103 iStock / Smederevac | 108 Unsplash / Kai Wei | 130 Pixabay / lhannemann | 138 iStock / SomebodyImages | 142 Pexels / Meriç Tuna | 156, 160, 238 Beta Santa Mónica | 166 Luis Corona Gochi | 178 iStock / Scharfsinn86 | 190 iStock / Zorandimzr | 196 Pexels / Todd Trapani | 206 iStock / Octavian Lazar | 210 Pexels / Markus Spiske | 213, 214 (abajo), 215 (abajo), 218, 219 Eva Aurora Bautista Calderon | 214 (arriba), 215 (arriba) Gerardo Delgado Ramírez | 220 Unsplash / Rick van der Haar | 224 iStock / Symbiot | 230 iStock / Maxvis | 231 Gregorio Núñez Hernández | 248 Unsplash / Tadeu Jnr | 254 Rubén Santos Echeverría | 256 Unsplash / Mihail Macri | 270 iStock / Natallia Saksonova | 275 iStock / Pongasn68 | 282 iStock / JackF | 296 Pixabay / Orko46.

Primera edición

Julio 2025, CDMX, México

ISBN: 978-607-9178-58-1

Todos los derechos reservados

La reproducción total o parcial de esta obra por cualquier procedimiento, incluyendo la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución de ejemplares mediante el alquiler o el préstamo, quedan estrictamente prohibidas sin la autorización escrita del editor, titulares o entidad autorizada y estarán sometidas a las sanciones determinadas por la ley.

Impreso y hecho en México



EL FUTURO SOSTENIBLE DE LA LECHE EN MÉXICO

Bajo la coordinación de:



Coordinadores:

José Luis Dávalos Flores

Everardo González Padilla

Y con la participación de las siguientes instituciones:



resumen ejecutivo

El ser humano ha generado un impacto en los recursos naturales del planeta a efecto de satisfacer sus necesidades, lo que repercute en el cambio climático, daño ambiental y estrés hídrico. El sector lácteo no es la excepción, principalmente en el eslabón primario de la cadena productiva por la generación de metano (CH₄) que producen los bovinos, derivado de la fermentación ruminal durante el proceso de alimentación, lo que nos obliga como sector a fomentar y aplicar políticas, investigación y desarrollo tecnológico para generar opciones viables para aspirar a una actividad neutra o con un impacto ambiental que pueda ser absorbido o compensado con procesos naturales.

El libro reúne el talento de personas expertas en diferentes líneas de investigación y de quehacer en el sector lácteo, pertenecientes a diferentes instituciones, abordando el tema de la sostenibilidad del mismo desde diferentes ópticas disciplinarias en el ámbito de la ciencia y la tecnología, con particular énfasis en el sector primario lechero en la mayoría del capitulado.

Así entonces, primeramente se aborda la importancia de la sostenibilidad de la cadena láctea presentando un marco contextual sobre los gases de efecto invernadero (GEI), el calentamiento global y el marco institucional internacional relacionado con ello.

Luego se señala el valor nutricional de la leche y sus derivados, acotando su importancia en la alimentación de más de 6 mil millones de personas en el mundo por su aporte de proteína de alto valor biológico, lípidos, calcio y otros minerales, así como vitaminas, en todas las etapas de vida de las personas, y más aún en la niñez. De igual modo, se acotan los beneficios que representa su consumo en la salud humana, por la disminución de riesgos de enfermedad cardiovascular, diabetes y obesidad, entre otros.

Posteriormente se presenta la estructura productiva y socioeconómica de la lechería en México, destacando que dada la diversidad de condiciones agroecológicas y socioeconómicas de nuestro país, derivan dos grandes modelos productivos: la lechería especializada prevaleciente en las zonas áridas, semiáridas y templadas, y que es la que aporta el mayor volumen productivo, particularmente la de tipo empresarial de gran escala; y la lechería de doble propósito, de mayor importancia en las zonas tropicales, de impacto social en su contexto regional, al igual que ocurre con la lechería familiar especializada de pequeña escala en todo el país. Lo anterior remarca que las acciones enfocadas a la sostenibilidad láctea deben ser diferenciadas.

En el capítulo subsecuente se presenta la perspectiva de la industria procesadora respecto a la sostenibilidad, acotándose que se ha convertido en una prioridad no sólo para el

bienestar del planeta, sino también para el éxito a largo plazo de las empresas, donde los consumidores están cada vez más interesados en comprar productos que demuestran un compromiso con el medio ambiente. Asimismo, las acciones para la sostenibilidad pueden mejorar la eficiencia operativa al entender cómo la reducción del consumo de recursos y de generación de residuos puede contribuir a la reducción de costos y a la mejora de la rentabilidad de la empresa.

Luego se abordan los inventarios de GEI antropogénicos en México con base en la métrica oficial y con énfasis en los generados por la agricultura y ganadería. La ganadería vacuna representa 76.7% de las emisiones de GEI del sector de la Agricultura, Forestería y Uso de Suelo (AFOLU), donde 62.2% se generan por fermentación entérica y 14.5% por la gestión de estiércol, en los inventarios de GEI nacionales oficiales. Se estima que alrededor de 15% de las emisiones GEI generadas por bovinos en México se asocian con la producción de leche.

Posteriormente se presentan las herramientas para medir la huella de carbono en la producción lechera, derivado de la importancia fundamental que demanda la medición de metano para avanzar hacia una producción más sostenible y eficiente, con varios propósitos: impacto ambiental, eficiencia productiva, regulaciones y políticas, selección genética animal, y desarrollo de estrategias de mitigación. Se describen las principales herramientas, como las cámaras respiratorias, la técnica de gas trazador SF₆, el sistema GreenFeed®, el sistema Sniffer, los sensores láser, la espectroscopía infrarroja, los modelos de predicción, la imagenología hiperespectral, los sensores de metano basados en nanotecnología y el análisis de isótopos estables de carbono.

También se aborda el bienestar animal como un eje sustantivo en la actividad lechera, dada la preocupación no sólo de la calidad nutricional y sanitaria de los lácteos que consumimos, sino de cómo se producen éstos tanto ética, social y ambientalmente hablando. Se presenta el contexto científico y conceptual para la evaluación e indicadores del bienestar animal basado en cinco dominios: nutrición, ambiente, salud, interacciones conductuales y estado mental. De igual manera, se presentan los principales problemas de conducta y bienestar en ganado lechero: agresión y competencia social, dolor, cojeras y conductas de reposo, mastitis, separación temprana y aislamiento del becerro.

Por otro lado, se aborda el mejoramiento genético del ganado lechero como estrategia para reducir las emisiones de metano, destacando que las ganancias logradas a través de la genética son permanentes y aditivas. Además del efecto ambiental de dicho GEI, hasta 12% de la energía bruta consumida por el animal

se pierde como metano, afectando la eficiencia y productividad lechera. El capítulo describe la base genética de las emisiones de metano y la variabilidad genética entre las vacas para la producción del mismo, lo que sugiere la posibilidad de una selección genética eficaz en ese sentido. Pero también se hace énfasis en que la selección de vacas por variables de productividad (fertilidad, calidad de leche, resistencia a enfermedades, etcétera) contribuye a incrementar la producción láctea y disminuir la del metano por litro de leche. Finalmente, se describe a la genómica como herramienta promisorio para obtener vacas de bajas emisiones de CH₄.

Otra variable sustantiva en la sostenibilidad lechera es la salud animal y su impacto en la misma desde dos ámbitos: por su contribución a la eficiencia productiva y como componente imprescindible del bienestar animal. La salud digestiva en bovinos tiene impacto directo en la cantidad de metano que producen. Por otro lado, se discute que el manejo adecuado de la salud animal puede prevenir el uso de tratamientos antibióticos innecesarios y el desarrollo de resistencia antimicrobiana.

Ligado indisolublemente al tema anterior, subyace el manejo de la bioseguridad en las unidades de producción lecheras (UPL). Y este punto no sólo interfiere en el ámbito exclusivo de la salud animal, sino de Una Sola Salud, donde la interacción de la salud humana, la animal y la ambiental confluyen, y de ello da cuenta la aparición de enfermedades emergentes, donde 60% de las mismas tienen un origen animal. El capítulo describe cómo los factores tales como urbanización, deforestación y calentamiento global han alterado los ecosistemas, incrementando la proliferación de vectores zoonóticos (mosquitos, garrapatas, entre otros) y el contacto entre fauna silvestre y ganado. Se describen las vías de transmisión de enfermedades en el ganado y los niveles de intervención en un plan de bioseguridad.

Las instalaciones de la unidad de producción lechera también juegan un papel muy relevante, tanto porque un buen diseño incide en la productividad y bienestar del animal, como por las acciones tendientes a incorporar tecnología o modificar criterios de manejo en el ganado, y eventualmente hacer adecuaciones a las construcciones para cumplir con la responsabilidad de proteger el medio ambiente, reduciendo la producción y emisión de contaminantes y gestionando, responsablemente, los desechos de la UPL. Se aborda la ventaja de contar con equipamientos que permiten mejorar el uso de la energía eléctrica, como es el caso de los preenfriadores de leche, tanques para recuperar calor, sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaica con paneles de celdas solares, instalación de biodigestores anaerobios que generan electricidad, calor y fertilizante natural (bioles).

Por otro lado, sin duda la alimentación del ganado juega el lugar preponderante en las estrategias de control de emisión de CH₄. Tres

capítulos abordan la temática en diferentes vertientes: general, el uso de aditivos y suplementos, y la producción y uso de forrajes.

La elaboración de dietas de precisión para el ganado lechero es la estrategia de mayor viabilidad y aplicación práctica para disminuir la emisión de GEI. Dietas con mayor calidad nutricional y digestibilidad pueden reducir la producción de metano al mejorar la conversión alimenticia y disminuir el tiempo de retención de alimento en el rumen. Por otro lado, los forrajes de mejor calidad contienen un mayor contenido de carbohidratos no estructurales y menor contenido de fibra y lignina, lo que permite una menor producción de metano. La adición de lípidos también reduce la producción de metano, al igual que el procesamiento de los granos. Asimismo, la optimización del balance de energía y proteína en la dieta del ganado lechero permite reducir las emisiones de otro potente GEI, el óxido nitroso (N₂O), a través de la pérdida de nitrógeno en la orina y heces.

En cuanto al uso de suplementos y aditivos usados para la reducción del metano, se acota que los mecanismos para reducir la síntesis del mismo en el rumen son bien conocidos, siendo los tres principales: 1) redireccionando el hidrógeno (precursor del CH₄) a otras vías bioquímicas alternas a la metanogénesis; 2) modificando el patrón de fermentación ruminal, y 3) afección a las arqueas metanogénicas. Existen varios aditivos, y entre los más difundidos se hallan el 3-Nitrooxypropanol (3NOP), los taninos, las saponinas, aceites esenciales, algas marinas y los ionóforos. El capítulo específico describe sus mecanismos de acción, destacando que, para el caso de México, la diversidad en las condiciones climáticas permitirá disponer, a través de la investigación, de una amplia variedad de follajes, vainas de árboles y arbustos que contienen metabolitos secundarios (taninos condensados, saponinas, flavonoides y aceites esenciales) que se pueden emplear como suplementos alimenticios en los sistemas de producción lechera de pequeña escala, con potencial de mitigar las emisiones de CH₄ ruminal y entérico.

En cuanto a los forrajes, al ser la base de la alimentación de los rumiantes, su esquema de producción y uso juega un rol preponderante en la sostenibilidad sectorial. En México, el principal forraje usado en la ganadería lechera especializada es el maíz almacenado como ensilaje. En este sentido, la selección de la semilla y la madurez de la planta a la cosecha tiene el potencial de contribuir fuertemente a la producción sostenible de maíz y de leche.

El tema del manejo del estiércol es también de gran relevancia en las estrategias inmediatas de mitigación, ya que el mismo no sólo es fuente de metano, sino también de óxido nitroso. Para el manejo del estiércol ya existe un abanico tecnológico que va desde innovar en generar fertilizantes y plaguicidas orgánicos, hasta energías alternativas. Se señala la necesidad de romper paradigmas que visualizan al estiércol como un desecho fuente

de contaminación, para abordarlo como un insumo a reintegrar circularmente en los procesos productivos. El capítulo específico aborda diferentes sistemas de aprovechamiento del mismo.

Por otro lado, no sólo se deben considerar opciones para mitigar las emisiones de GEI, sino también para secuestrar el carbono. En tal sentido, el suelo puede almacenar grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera. Esta función de sumidero de carbono se logra a través de la fotosíntesis, proceso mediante el cual la vegetación convierte el CO₂ en compuestos orgánicos que forman tejidos vegetales. El capítulo particular de manejo del suelo agropecuario y secuestro de carbono aborda estrategias que contribuyen a recarbonizarlo, que se han utilizado en el norte del país, como la labranza mínima y la incorporación de materia orgánica, que además, puede mejorar la estructura del suelo y aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes. Lo anterior debe acompañarse de sistemas de riego eficientes. Estas estrategias, además, mejoran la calidad del suelo, y por consecuencia, su productividad.

Asimismo, no se puede dejar de lado la sostenibilidad del uso del agua en México, país que padece de fuerte estrés hídrico, más aún en una actividad como la lechera, la cual demanda fuertemente este recurso. El capítulo de estrategias para la disminución de la huella hídrica acota conceptos y acciones fundamentales en las diferentes etapas del proceso productivo de leche, desde la producción forrajera, la alimentación, el manejo reproductivo, la crianza de reemplazos y el ordeño, hasta la salud. Destacan entre las estrategias el uso de sistemas de riego eficientes, el cultivo de forrajes adecuados a las características agroclimáticas de cada región y los patrones de cultivo.

El capítulo de producción no especializada de leche en el trópico alude a las características particulares de este sistema productivo en México, como la utilización, principalmente, de vacas cruzadas de cebú con razas europeas; requiere la presencia del becerro para estimular la bajada de la leche; sistemas extensivos de pastoreo; bajos indicadores productivos. Se señalan estrategias para disminuir la emisión de GEI en dicho sistema, entre las que se mencionan inducir forrajes mejorados para la alimentación animal, evitar contundentemente la quema y apertura de selvas para las siembras agropecuarias y el pastoreo, mejoramiento genético del ganado en este sistema, la restricción del amamantamiento y suplementación estratégica, y el adecuado manejo sanitario del ganado en el trópico. Igualmente, se mencionan los sistemas silvopastoriles como una opción sustentable, además de que se generan recomendaciones en torno a los mismos.

Por otro lado, se presentan resultados con el modelo de ganadería regenerativa llevado a cabo en los Altos de Jalisco, entendida como un sistema que tiene como objetivo favorecer la regeneración del ecosistema. Se basa en prácticas como un sistema de rotación planificada del pastoreo (en el caso descrito

en el capítulo, el modelo de pastoreo racional Voisin), el uso mínimo de agroquímicos, la integración de árboles y vegetación nativa en los potreros, y las buenas prácticas productivas con foco particular en la alimentación del ganado.

En la misma tónica de sostenibilidad, se aborda la circularidad de la cadena de producción lechera en el país, acotándose que los sistemas productivos circulares se basan en el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles y la reutilización del desperdicio, formando un ciclo en el que insumos alimenticios y subproductos se transforman en alimentos sanos y nutritivos para el consumo humano. Se presentan elementos clave para transitar hacia la circularidad de la cadena láctea, como la conservación de los ecosistemas naturales remanentes (cero deforestación), intensificación de la producción, el uso de biofertilizantes y el aprovechamiento de residuos orgánicos.

El libro también aborda la normatividad que regula el sector lácteo en el país, presentando el contexto de la misma desde las Leyes y Normas Oficiales Mexicanas (NOM), ambas de carácter obligatorio, y las Normas Mexicanas (NMX, que en adelante se convertirán en estándares de calidad) de adopción voluntaria por los particulares. Se acota que la normatividad que aplica al sector lácteo contribuye a la sostenibilidad de la cadena, pues las normas están orientadas a establecer requisitos que mejoran los procesos de producción, obtención, conservación, transporte, proceso, distribución y comercialización de la leche y sus productos.

Asimismo, el libro presenta elementos de vanguardia tecnológica para la producción lechera en el capítulo de inteligencia artificial. Así, se describe la integración de la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT) y el manejo de grandes bases de datos (BigData) que está permitiendo optimizar recursos y aumentar la eficiencia de la producción de leche y otros productos de origen animal.

El libro finaliza con la presentación del Caso Margarita de Danone, proyecto que ha sido icónico en México con el objetivo de hacer más competitivos a productores de leche de pequeña escala familiar en Jalisco y Aguascalientes, a través de modelos sostenibles de producción. El proyecto ha logrado integrarlos con la industria procesadora como pivote tractor (Danone de México), la academia, organizaciones no gubernamentales (ONG), banca de desarrollo y gobierno. Se presentan datos de resultados obtenidos por el proyecto Margarita en sus 15 años de vida.

La adopción de un desarrollo sostenible en la cadena láctea no implica sólo y exclusivamente “tecnología”, sino también un compromiso ético, una oportunidad de devolver el amor social al paisaje rural y que la huella del sector ante el cambio climático no sea negativa, sino de restablecimiento del reconocimiento de su contribución, tanto a la nutrición humana como al bienestar de los animales y a la restauración del planeta.

introducción

Es un honor presentar este libro sobre la sostenibilidad del sector lácteo en México, un tema clave para el futuro de nuestra industria, de nuestro planeta y de seguir ofreciéndole a los consumidores productos superiores en nutrición, sabor y salud. En Danone creemos profundamente en el poder y la bondad de la leche y los fermentos. Desde nuestros orígenes, hemos estado comprometidos con llevar salud a través de la alimentación al mayor número de personas posible, y eso no puede lograrse sin un planeta sano.

La descarbonización del sector lácteo representa un desafío complejo, pero también una oportunidad única para impulsar una transformación profunda hacia una agricultura regenerativa y baja en carbono. En Danone, hemos comprobado que este enfoque fortalece el potencial natural de cada granja y aumenta la resiliencia de sus recursos. Restaurar la salud del suelo, proteger la biodiversidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es posible, y además, urgente.

Este libro reúne la experiencia y la visión de algunos de los actores más relevantes en la materia: centros de investigación, universidades, expertos en cambio climático, sustentabilidad, ganadería y producción lechera. Juntos, exploramos las principales palancas para avanzar hacia una transición justa, resiliente y con impacto, que contribuya al objetivo global de no incrementar la temperatura del planeta.

Para Danone la leche está en el corazón de lo que hacemos y de cómo lo hacemos. Nuestra responsabilidad va más allá de nuestras oficinas: se extiende a toda nuestra cadena de valor. Por eso, estamos plenamente comprometidos con la descarbonización de nuestra cadena de suministro, en línea con los objetivos establecidos por la iniciativa de los Science-Based Targets (SBTi), lo que implica una reducción de aproximadamente 40% de nuestras emisiones de CO₂, así como una transición progresiva hacia prácticas de agricultura regenerativa. Adicionalmente, trabajamos para reducir en un 30% las emisiones de metano provenientes de la leche fresca para 2030.

Nos llena de orgullo el trabajo que hemos realizado durante los últimos 15 años con productores de leche en los Altos de Jalisco y Aguascalientes, a través del Programa Margarita. Con capacitación, asesoría técnica, financiamiento accesible y tecnología, los productores han aumentado su productividad en un 37% y triplicado sus ingresos. Hoy, la leche del proyecto Margarita representa 35% del abastecimiento total que utilizamos para nuestros productos y estamos orgullosos de acompañar a los pequeños y medianos productores en su transición hacia la agricultura regenerativa, haciéndolos más resilientes frente a los efectos del cambio climático.

La lucha contra el cambio climático es una responsabilidad compartida. Necesitamos trabajar de manera articulada: desde el sector privado, con Organizaciones No Gubernamentales (ONG), asociaciones de consumidores, academia, y, sobre todo, con los gobiernos e instituciones públicas. Sólo a través de un enfoque colectivo podremos movilizar el apoyo necesario y generar las condiciones adecuadas para avanzar en la dirección correcta.

Estoy convencida de que solamente unidos podremos establecer un nuevo estándar para la industria láctea en México: un modelo que sea sostenible, resiliente y que devuelva el orgullo a quienes producen y consumen leche en el país. Este libro es reflejo de ese compromiso y también un llamado a la acción para quienes comparten nuestra visión de un futuro más saludable y sostenible.

Silvia Dávila

Presidenta de Danone Latam y
Directora General de Danone México

introducción

En un planeta que supera los nueve mil millones de seres humanos y conocedores como somos de los retos sociales y ambientales de este tiempo, no es nuevo preguntarse cómo será el futuro de nuestra alimentación: ¿podremos producir alimentos esenciales para la vida y, al mismo tiempo, regenerar la vida misma?

No sólo creemos que sí, sino que también sabemos que es urgente hacerlo, movidos por la convicción de la esperanza, el poder de la inclusión y una mirada profundamente regenerativa. Frente a los desafíos que vivimos –la emergencia climática, la degradación de los suelos, la escasez de agua, tantos otros–, necesitamos escuchar y conocer las historias reales que están transformando vidas y que demuestran que las empresas pueden ser una fuerza para el bien. Danone México representa esta nueva generación de empresas movidas por un propósito y que no sólo imaginan un futuro mejor, sino que trabajan todos los días para construirlo.

Descarbonizar el sistema alimentario en México no es solamente un desafío técnico o una exigencia ambiental: es un acto de responsabilidad intergeneracional. Es la oportunidad de sembrar un legado de salud, de alimentación digna y de vida próspera para quienes habitarán esta tierra en las próximas décadas. Porque lo que hoy disfrutamos, es fruto de la imaginación y la acción de las generaciones que nos precedieron. Y en este contexto de urgencia y posibilidad, Danone México se ha consolidado como un actor clave, asumiendo un compromiso retador: transformar su cadena de valor láctea, no sólo para reducir su impacto, sino para regenerar vida, empoderar productores y ofrecer a las futuras generaciones un México más fértil, justo y resiliente.

En México, el sistema agroalimentario genera alrededor de 12% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El sector lácteo, en particular, enfrenta presiones por su contribución significativa al cambio climático a través de emisiones de metano y su demanda intensiva de agua –más de 70% del agua dulce disponible se destina a actividades agropecuarias–. La descarbonización de la cadena de valor láctea no es una tarea menor. Requiere innovación tecnológica, cambios en las prácticas productivas y una nueva relación entre quienes producen y quienes consumen. Y es precisamente en este desafío donde Danone México es pionera. Por este motivo, no puede ser más apropiada la publicación de esta estrategia de descarbonización del

sector lácteo en la que participan ganaderías, centros de investigación, universidades y empresas con un mismo objetivo: descarbonizar un sector que contribuye significativamente a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Pero también, en un país donde más de cinco millones de personas dependen de la agricultura y la ganadería para tener una vida digna, la descarbonización ha de ir de la mano de la regeneración de oportunidades económicas y sociales. Pequeños productores que han sido históricamente marginados encuentran en este nuevo modelo un espacio para crecer con autonomía, mejorar sus ingresos, acceder a innovación y dignificar su rol como guardianes del territorio. Regenerar no es sólo capturar carbono: es también devolver la dignidad y el futuro a las comunidades rurales de México.

Danone México es parte de la comunidad de las Empresas B de México desde 2022. Este movimiento, que en América Latina reúne a más de 1,300 empresas en dieciocho países, pone el bienestar de las personas y del planeta en el corazón de la actividad empresarial, para transitar hacia una nueva economía que sea inclusiva, equitativa y regenerativa. Esta iniciativa de Danone México demuestra que las grandes empresas, además de adaptarse al cambio, también pueden liderar la transición hacia ese nuevo modelo económico.

Nos honra la confianza de Danone México en el movimiento de las Empresas B y su compromiso para dar respuesta a los desafíos de su actividad empresarial y de su propia cadena de valor. Esta iniciativa es el mejor ejemplo para otras empresas y organizaciones que seguirán sus pasos. Porque ser una mejor empresa para el mundo, lejos de ser un sentimiento ingenuo, es la más poderosa estrategia empresarial de transformación.

Javier Herrero Postigo

Director Ejecutivo Sistema B México

índice

Resumen ejecutivo	5
Introducción de Silvia Dávila	9
Introducción de Javier Herrero Postigo	11
Autores	14
Importancia de la sostenibilidad de la cadena láctea en el cambio climático	27
El valor nutricional de la leche y los derivados lácteos	37
Estructura productiva y socioeconómica de la producción de leche de vacunos en México	51
La sostenibilidad y la descarbonización en la industria procesadora láctea	65
Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en México	79
Herramientas para la medición de la huella de carbono en la producción láctea	87
Bienestar animal y sostenibilidad en la producción lechera	99
El mejoramiento genético para reducir las emisiones de CH ₄	113
Salud animal y su impacto en la sostenibilidad lechera	129
Manejo de la bioseguridad en las unidades de producción lechera: la primera línea de defensa para una salud animal, humana y ambiental	141
Instalaciones y equipamiento: su impacto en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)	155
Alimentación y emisiones de gases efecto invernadero (GEI)	165
Potencial de suplementos y aditivos para la reducción de metano en bovinos	177
Producción de forraje de maíz como estrategia de productividad y mitigación de la emisión de gases con efecto invernadero de vacas lecheras	189
Manejo de estiércol	201
Manejo del suelo y secuestro de carbono	209
Estrategias para la disminución de la huella hídrica en la producción intensiva lechera en México	223
Producción de leche no especializada en el trópico: estrategias de acción que contribuyen a la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI)	247
Ganadería regenerativa, un modelo de transición a prácticas sustentables en sistemas de lechería familiar para los Altos de Jalisco	259
Hacia la circularidad de la cadena de producción láctea en México	269
La normatividad que regula el sector lácteo mexicano y su impacto en la sostenibilidad	281
La inteligencia artificial como apoyo a la sostenibilidad de las lecherías	295
Caso Margarita Danone	305
Conclusiones y recomendaciones	315

autores

En orden alfabético



ANTONIO ANAYA SALGADO

Ingeniero agrónomo especializado en irrigación, egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Cursó la maestría en Ciencias de la Irrigación en el Instituto Tecnológico de Torreón y el doctorado en Hidrociencias en el Colegio de Posgraduados. Tomó cursos por intercambios académicos en la Universidad Estatal de Oklahoma. Ha participado como colaborador en Programas de Transferencia de Tecnología Integral en Riegos (PROTTIR) para diferentes asociaciones de usuarios y productores, con atención a problemas de efectos del cambio climático, escasez de agua, así como eficiencia en el uso y manejo de los recursos para la producción de alimentos. Forma parte de grupos interdisciplinarios para la atención a problemáticas antropogénicas en el norte de México, desempeñándose también como asesor en el uso y manejo del agua ornamental en zonas del sur de EUA. Actualmente se desempeña como investigador titular del INIFAP, en el programa de ingeniería de riego.



PAOLA BARRIOS TREJO

Cursó la licenciatura de Nutrición en la Universidad Anáhuac México Sur, en donde recibió el premio Ceneval a la excelencia académica. Posteriormente realizó el servicio social en el Instituto de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, en el Departamento de Hemato-Oncología. Actualmente es investigadora voluntaria en el mismo departamento en donde participa en diversos protocolos, conferencias y cursos. Además, participa en diversas empresas brindando consulta nutricional.



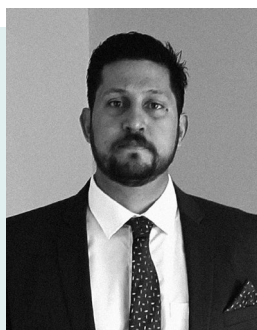
EVA AURORA BAUTISTA CALDERON

Es doctora en Ciencias en Edafología por el Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. Trabajó como investigadora posdoctoral en el Instituto de Ecología A. C., donde llevó a cabo diversos estudios relacionados con la dinámica y el secuestro de carbono. Actualmente, se desempeña como investigadora titular en el programa de suelos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Su línea principal de investigación se centra en la dinámica del carbono, así como en la huella y el secuestro de carbono en suelos, abordando estas temáticas como estrategias para mitigar el cambio climático.



ANDRÉS CADENAS SOBERANIS

Ingeniero agrónomo especialista en producción animal tropical por el Instituto Tecnológico de Tizimín. Estudió la maestría en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Su trabajo de investigación se basó en la medición del requerimiento de energía neta para mantenimiento de bovinos en el trópico en cámaras de respiración de circuito abierto, a través de la técnica de calorimetría indirecta. Actualmente se encuentra realizando sus estudios de doctorado en el Laboratorio de Cambio Climático y Ganadería de la UADY. Continuando la línea de investigación de la eficiencia energética.



CHRISTIAN HUMBERTO CASILLAS GÓMEZ

Médico veterinario zootecnista y maestro en Producción Pecuaria por la Universidad de Guadalajara (U de G). Actualmente cursa el doctorado en Biociencias, con estudios dirigidos para investigación en el área de forrajes y nutrición animal, en esta misma casa de estudios. Es consultor de empresas enfocadas a la nutrición animal del sector privado para el diseño de premezclas comerciales en el área de rumiantes. Da consultoría a ganaderos en transición a prácticas de ganadería regenerativa cuya adaptación de estas metodologías se llevan en los Altos de Jalisco. Es profesor de asignatura en la Universidad de Guadalajara y ha sido ponente en congresos regionales, nacionales e internacionales. Fundador de Asesoría en Nutrición Sustentable (ANS) de México y cocreador de la metodología “GRLA” (Ganadería Regenerativa Lechera Alteña).



MÓNICA CERVANTES JIMÉNEZ

Licenciada en Biología y doctora en Ciencias del Agua con mención honorífica otorgada por el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), de la Universidad Autónoma del Estado de México. Realizó una estancia posdoctoral en la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Es miembro del SNII nivel I y profesora-investigadora de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Naturales de la UAQ. Ha publicado artículos relacionados con el cambio climático, gestión integrada de cuencas, sustentabilidad y análisis a nivel ecosistema. Sus principales intereses de investigación abarcan el análisis de las funciones de la vegetación a nivel de ecosistema, utilizando sensores remotos y aprendizaje automático para evaluar la producción ganadera en sistemas de pastoreo intensivo y con prácticas ganaderas regenerativas. Además, se centra en la restauración ecológica y el monitoreo de las dinámicas de carbono y agua dentro de los ecosistemas.



LUIS CORONA GOCHI

Médico veterinario zootecnista por la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Realizó el curso de Ganadería Lechera Intensiva, en Israel. Estudió el doctorado en Ciencias Agropecuarias por el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Realizó su estancia de investigación en el Desert Research and Extensión Center, University of California-Davis. Es profesor titular “C” de tiempo completo definitivo en el Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la FMVZ-UNAM. Pertenecer al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel I. Es profesor de licenciatura, especialidad y maestría. Participa en el Sistema de Universidad Abierta en diferentes círculos de estudio en toda la República Mexicana. Además, es asesor particular a unidades de producción y plantas de alimentos. Sus áreas de investigación son el procesamiento de alimentos, valoración de recursos forrajeros y estrategias nutricionales para disminuir emisiones de metano.



JOSÉ LUIS DÁVALOS FLORES

Es médico veterinario zootecnista, con estudios de maestría y doctorado, graduado con honores. Actualmente se desempeña como profesor titular definitivo en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la UNAM. Su línea académica de trabajo e investigación es la competitividad del sector lechero mexicano. Participa como representante México ante el IFCN-Dairy Research Center, e igualmente por la UNAM ante la Comisión Ejecutiva de Bovinos Leche, COFOCALEC, y la FIL México. Es autor o coautor de 38 capítulos en libros especializados y de investigación; editor de tres libros; autor o coautor en 16 artículos publicados en revistas científicas indexadas y en 66 publicaciones en Memorias Científicas. Ha dictado 90 conferencias en foros nacionales e internacionales.



GERARDO DELGADO RAMÍREZ

Doctor en Ciencias, en Hidrociencias, por el Colegio de Posgraduados (COLPOS), se desempeña actualmente como investigador titular en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Se encuentra adscrito al Centro Nacional de Investigación en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), donde su principal línea de investigación se centra en el uso eficiente del agua y la energía eléctrica en la agricultura de cultivos forrajeros.



JUAN ESTRADA ÁVALOS

Ingeniero agrónomo en irrigación, con maestría en Riego por la UAAAN y doctorado en Hidrología por la Universidad de Montpellier, Francia; se ha desempeñado como investigador del INIFAP, especializado en el estudio y gestión de los recursos hídricos, participando en proyectos nacionales e internacionales enfocados en cuencas hidrológicas, el análisis del ciclo hidrológico y el uso del agua en actividades productivas, además del impacto del cambio climático en su disponibilidad; autor y coautor de más de 70 artículos científicos, tres libros y varios capítulos de libros sobre los recursos naturales y la gestión del agua; ha impulsado el uso de herramientas y estrategias de su conservación mediante investigación básica y aplicada, la formación de especialistas y la colaboración interinstitucional.



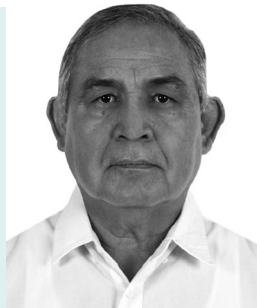
FRANCISCO AURELIO GALINDO MALDONADO

Profesor en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM. Obtuvo el doctorado en la Universidad de Cambridge, Reino Unido, en 1996. Es jefe fundador del Departamento de Etología de la FMVZ-UNAM y obtuvo la Distinción Universidad Nacional (UNAM) en 2004. Desde 2013 es coordinador en México del Centro Colaborador en Bienestar Animal y Sistemas Pecuarios Sostenibles para la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). Su principal área de interés es la producción pecuaria sostenible, tema donde tiene varias publicaciones en revistas arbitradas. Es coeditor de Animal Welfare 3ª ed. (CABI, 2018), y Etología Aplicada (UNAM, 2024). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel 3).



SILVIANO GALLARDO RAMÍREZ

Ingeniero agrónomo zootecnista por la Universidad La Salle Bajío, con especialidad en Nutrición Vegetal y maestría en Agricultura Protegida. Es gerente general en la producción de forraje, silo de maíz y triticales para la alimentación de la vaca lechera de la empresa PROAN, además de formar y capacitar personas e ingenieros agrónomos para cubrir las diferentes áreas de oportunidad en el área agrícola.



JOSÉ GUADALUPE GARCÍA MUÑIZ

Ingresó a la Escuela Nacional de Agricultura en 1977 y egresó de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) como ingeniero agrónomo especialista en Zootecnia en 1984. Trabajó dos años como asesor en producción de leche en el estado de Jalisco para el FIRA-Banco de México. Ingresó de nuevo a la UACH en 1986, ahora como profesor de tiempo completo, para colaborar en los cursos de sistemas de producción de bovinos lecheros. De 1992 a 1998 estudió la maestría en Ciencias Agrícolas y su doctorado en Ciencia Animal en la Universidad de Massey, Nueva Zelanda. Desde 1998 ha dedicado gran parte de su tiempo a desarrollar el módulo de producción de leche orgánica en pastoreo, en la Granja Experimental del Departamento de Zootecnia de la UACH. Además de su pasión por las vacas y las praderas, disfruta involucrarse en la solución de problemas que impliquen la gestión y modelación estadística de bases de datos diversas. Tiene una sólida formación autodidacta en estadística. Participa en varias de las líneas de investigación del posgrado en Producción Animal, y de manera principal en la línea Evaluación y Gestión Sostenible de Recursos Genéticos Pecuarios.



ADRIANA GARCÍA RUIZ

Médico Veterinario Zootecnista egresado de la Universidad Autónoma de Querétaro, con una maestría y doctorado por la Universidad Nacional Autónoma de México con enfoque en Mejoramiento Genético Animal. Investigadora en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal del INIFAP, en donde hace investigación en genética y el uso de herramientas genómicas en ganado lechero. Es miembro del SNII nivel 2 e integrante de la Academia Veterinaria Mexicana.



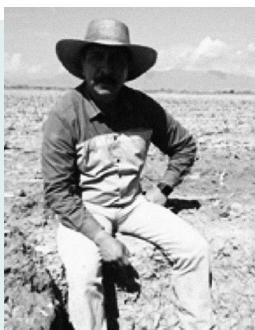
LAURA GÓMEZ DE LA TORRE

Maestra en Producción Animal Sustentable por la Universidad de Guadalajara. Desde 2012, forma parte del cuerpo docente del Centro Universitario de Los Altos, donde participa en proyectos vinculados a los sectores agropecuario y educativo. Su vocación profesional se centra en el desarrollo de conocimiento aplicado a la región Los Altos de Jalisco, con la finalidad de impulsar métodos de producción agropecuaria más eficaces y responsables con el medio ambiente, tanto en Jalisco como a nivel nacional.



JOSÉ LUIS GONZÁLEZ BARRIOS

Es biólogo de la Universidad Autónoma de Nuevo León y edafólogo por el Instituto Nacional Agronómico de París-Grignon y doctor de la Universidad de Montpellier. Sus áreas de competencia son la hidrología-edafología de cuencas receptoras de agua y el impacto ambiental de los sistemas productivos agrícolas, pecuarios y forestales. Desde 1993 es Investigador del INIFAP adscrito al CENID-RASPA; corresponsable de proyectos de investigación nacionales e internacionales; coautor de 130 artículos, 35 capítulos de libro y cinco libros; docente o asesor científico en universidades mexicanas y extranjeras; evaluador del Programa ALBan de universidades europeas y miembro de asociaciones edafológicas como la IUSS, SSSA, l'AFES y SMCS. Ha recibido distinciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad de Montpellier y el Sistema Nacional de Investigadores.



GUILLERMO GONZÁLEZ CERVANTES

Investigador del INIFAP CENID-RASPA en física del suelo y medios porosos. Es ingeniero agrónomo en suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, egresado en 1987, y también maestro en física de suelos por la misma institución, la cual concluyó en 1992. Además, cursó una maestría en Ciencias del Suelo en L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, en Rennes, Francia (1999). Hizo su doctorado en Ciencias de la Tierra y Ambientales en L'Université d'Angers, Francia (2002).



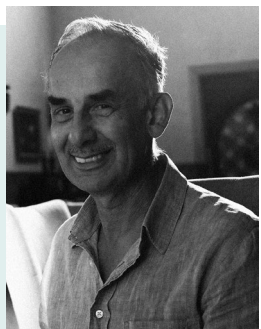
EVERARDO GONZÁLEZ PADILLA

Se graduó como médico veterinario zootecnista con mención honorífica en la Escuela Nacional de Medicina Veterinaria y Zootecnia (ENMVZ), hoy la FMVZ de la UNAM, institución donde también fue ayudante de profesor y auxiliar de investigación, al igual que en la Fundación Rockefeller. Tiene un Master of Science (Universidad de Florida), con área mayor en mejoramiento genético, y estudios de Doctor of Philosophy (Universidad Estatal de Colorado), con área mayor en fisiología y endocrinología reproductiva. Fue investigador, director y subdirector general de INIP y director de investigación pecuaria y de la Región Sur del INIFAP; subdirector general de Ganadería (SAG); director general de Alimentación Animal y Recursos Forrajeros y de la dirección general de Genética y Alimentación Animal (SARH); coordinador general de Ganadería (SAGARPA, 2007-2012), además de consultor de SENASICA. En el ámbito académico, ha sido profesor en la licenciatura y el posgrado en la UNAM, donde hoy es profesor titular. En esta casa de estudios también ha desarrollado y coordinado posgrados y graduado a maestros y doctores en ciencias. Es miembro del SNII. Tiene cerca de 80 trabajos originales publicados en revistas arbitradas y ha recibido reconocimientos nacionales e internacionales de organizaciones de profesionales, científicos y de productores.



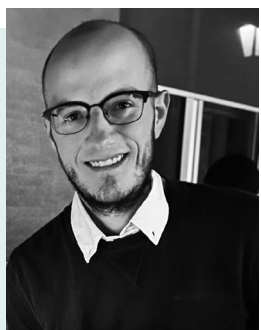
ARELI DANIELA GONZÁLEZ SANDOVAL

Egresada de la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia (2021) y la Maestría en Ciencias de la Producción y Salud Animal (2024), con orientación en Genética y Mejoramiento Animal, obteniendo mención honorífica en ambos niveles. Su excelencia académica la llevó a realizar una estancia en la Universidad de Georgia en 2024. Ha colaborado con investigadores del INIFAP en proyectos de genética y mejoramiento del ganado lechero, estudiando el componente genético del tiempo de rumia. Con experiencia en docencia como asistente de profesor en Genética y Métodos Estadísticos en su facultad, demuestra su compromiso con la formación. Su trayectoria se distingue por el rigor académico y su contribución al fortalecimiento del conocimiento científico.



AURELIO GUEVARA ESCOBAR

Estudió Medicina Veterinaria en la Universidad Nacional Autónoma de México y su maestría en Producción Animal con temas de administración computarizada en empresas porcinas y ácidos grasos saponificados en ovinos. En Massey University conoció integralmente el sistema productivo en pastoreo y el control de la erosión del suelo en Nueva Zelanda. Es especialista en producción lechera tropical, capacitado en el Ministerio de la Agricultura en la República de Cuba. Ha sido profesor en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, de la Universidad Nacional Autónoma de México, y en la Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. Sus investigaciones son sobre producción animal, agroforestería, pastoreo, ciclo del agua y carbono. Sus habilidades son programación, modelación matemática, estadística, nutrición animal, manejo de recursos naturales, entre otras. Su consultoría profesional es sobre optimización alimentaria.



ÁLVARO JOSÉ GUZMÁN DAIREAUX

Es médico veterinario formado en la Universidad del Salvador en Buenos Aires, Argentina y estudiante de segundo año de la maestría en Ciencias Veterinarias en la Universidad de Calgary, Canadá. Su investigación se centra en la resistencia antimicrobiana desde un enfoque de Una Salud. Además, se desempeña como editor y coordinador de gestión postventa en NutriNews International, donde colabora en la producción y difusión de contenido técnico en nutrición animal.



DARWIN HEREDIA NAVA

Es doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Cuenta con un posdoctorado en Producción Animal Sustentable. En el sector privado, ha trabajado en empresas enfocadas a la nutrición animal, en Organizaciones No Gubernamentales (ONG), como TechnoServe y NUUP, desempeñándose como asesor en nutrición para ganado lechero en proyectos de ganadería regenerativa. Actualmente es profesor de la Universidad de Guadalajara, donde imparte Unidades de Aprendizaje en licenciatura, maestría y doctorado. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) Nivel I, miembro editorial de revistas de divulgación científica nacionales e internacionales, cofundador de Asesoría en Nutrición Sustentable (ANS) de México y asesor de DASA “Nutrición Animal Sustentable”.



JUAN HEBERTH HERNÁNDEZ MEDRANO

Es médico veterinario zootecnista, especialista en fisiología reproductiva de bovinos. Fue pionero en el desarrollo y aplicación en México del sistema Sniffer (Phil Garnsworthy, Universidad de Nottingham) para la estimación de emisiones de metano en ganado lechero. Colaboró con el INIFAP en el primer proyecto de medición de metano en sistemas lecheros en México y ha liderado investigaciones sobre sostenibilidad ganadera en el trópico. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad de Calgary, donde estudia biomarcadores en leche y herramientas ‘ómicas’ para estimar emisiones de metano. Es autor de varios artículos científicos y de difusión sobre estimación de metano en diversos sistemas de producción lechera. Ha sido invitado a foros nacionales e internacionales para discutir estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en la ganadería.



KARLA ELENA HERRERA HIDALGO

Médica veterinaria zootecnista egresada de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la UNAM. Posee una maestría en Ciencias por la Universidad de Montreal, Canadá, así como un diplomado en Dirección Efectiva de Proyectos. Es estudiante de doctorado en el Programa en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal de su alma máter. Su formación académica está enfocada a la aplicación de protocolos y regulaciones basados en la ciencia, con el objetivo de mejorar la calidad de los productos de origen animal y contribuir al desarrollo sostenible, beneficiando tanto a los productores como a los consumidores y promoviendo la restauración de los ecosistemas. En el ámbito profesional, cabe destacar que, en 2014, formó parte del programa de servicio social en comunidades rurales de la Donkey Sanctuary Foundation; en 2015 inició su participación en actividades del Centro Colaborador (CC) en Bienestar Animal y Sistemas Pecuarios Sostenibles para la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA); en 2020 trabajó como consultora en la organización Humane Society International, y en 2022 colaboró en la implementación del diplomado en línea en Bienestar Animal de la FMVZ-UNAM. Actualmente, es ayudante académico en el CC en Bienestar Animal y Sistemas Pecuarios Sostenibles para la OMSA.



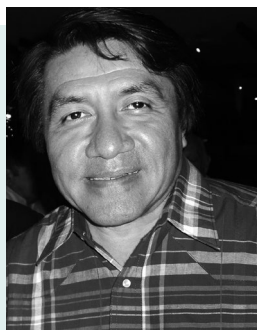
OFELIA ÍÑIGUEZ GÓMEZ

Doctora en Ciencias de la Educación por la Universidad Santander. Desde 2003, se desempeña como académica en el Centro Universitario de Los Altos de la Universidad de Guadalajara, en los ámbitos agropecuario y educativo. Su principal interés profesional es generar conocimiento regional en Los Altos de Jalisco. Con el propósito de promover prácticas agropecuarias más eficientes y sostenibles en Jalisco y en México.



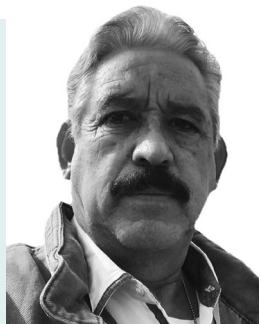
RAFAEL JIMÉNEZ OCAMPO

Médico veterinario zootecnista por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), realizó estudios de posgrado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se le otorgó el grado de maestro en Ciencias en Producción y Salud Animal y obtuvo su doctorado en la Universidad Autónoma de Yucatán. Es investigador titular “C” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), donde trabaja desde 2006 en la investigación en nutrición de rumiantes, caracterización y uso de ingredientes no convencionales y aditivos naturales para mitigar los gases de efecto invernadero (GEI). Fue becario del Programa de Becas de Desarrollo de la Alianza de Investigación Global sobre Clima, Alimentación y Agricultura (CLIFF-GRADS). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e investigadores (SNI) Nivel I. En la actualidad funge como director del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el Estado de Durango. Cuenta con más de cien publicaciones nacionales e internacionales, entre las que incluyen artículos científicos en revistas de alto impacto, artículos *in extenso*, folletos técnicos, notas de investigación e inserciones en revistas divulgativas.



JUAN CARLOS KU VERA

Médico veterinario zootecnista y doctor en Alimentación de rumiantes. Es profesor de alimentación de rumiantes en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán, donde es responsable del Laboratorio de Cambio Climático y Ganadería. Las líneas de investigación en las que trabaja son: valor nutritivo de los alimentos tropicales, eficiencia energética y mitigación de metano entérico en rumiantes. Ha publicado artículos en revistas científicas y graduado estudiantes de licenciatura y posgrado. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Academia Veterinaria Mexicana, de la Asociación Mexicana de Producción Animal y de la Asociación Americana de Ciencia Animal.



VICENTE LEMUS RAMÍREZ

Médico veterinario zootecnista egresado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cuenta con estudios de posgrado como especialista en Producción de bovinos (FMVZ-UNAM), así como de maestría por la Universidad de Massey (Nueva Zelanda). También tiene un diplomado en Reproducción Bovina (FMVZ-UNAM). Inicio su carrera laboral en el gobierno federal (SARH), dirigiendo un centro de fomento ganadero en producción de leche en el estado de Querétaro. De manera paralela, laboró como asesor privado en apoyo a productores lecheros en la región central de México durante más de diez años. A partir de 1995, se ha desempeñado como profesor titular de carrera en la FMVZ-UNAM, en asignaturas relacionadas con la producción del ganado bovino lechero bajo condiciones de confinamiento y en pastoreo tecnificado, tanto a nivel licenciatura como en posgrado (especialización y maestría). Ha publicado diversos artículos y dado conferencias en diversos foros. Ha recibido varias distinciones de carácter académico gremial.



ERNESTO MEDINA NUÑEZ

Ingeniero agrónomo por la Universidad de Guadalajara. Desde 2008, es asesor técnico especializado en producción de maíz grano, ensilaje de maíz y leche con una visión sustentable en la región Altos de Jalisco. Su mayor interés profesional es generar herramientas e información local y tratar de llevarla a los establos lecheros alteños para lograr una producción rentable y sustentable.



MARÍA DEL PILAR MILKE GARCÍA

Estudió la licenciatura en Nutrición y Ciencia de los Alimentos por la Universidad Iberoamericana. En 1995-1996 desarrolló alimentos para niños en vulnerabilidad en LICONSA y obtuvo su nombramiento como investigadora en Ciencias Médicas del Departamento de Gastroenterología del INCMNSZ. En 2008 obtuvo su doctorado en Medicina Interna en la Universidad Autónoma de Barcelona. De 2008 a 2023 fue asignada a la dirección de Nutrición, y de 2023 a la fecha al Departamento de Hemato Oncología, desde donde realiza investigación clínica y brinda atención nutricia a los pacientes de este departamento. Ha colaborado desde 2009 a la fecha con CANILEC y FundHepa. Es autora de 57 capítulos y 59 artículos.



MARÍA DENISSE MONTOYA FLORES

Doctorado en Ciencias Agropecuarias por la Universidad Autónoma de Yucatán. Investigador en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias desde 2008. Sus líneas de investigación en rumiantes incluyen el uso de ingredientes alternativos en la alimentación, manipulación de fermentación ruminal, cuantificación y alternativas de mitigación de metano entérico, relación de la microbiota ruminal y variables productivas, evaluación del uso potencial de metabolitos secundarios de plantas como aditivos para modular la fermentación ruminal y mejorar la eficiencia de producción.



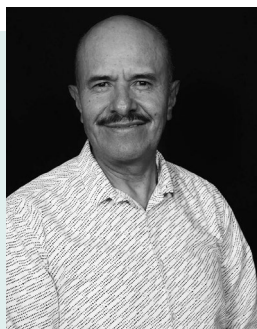
JUAN DE JESÚS NAVA NAVARRETE

Médico veterinario zootecnista por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), egresado en 2004 con mención honorífica, y maestro en Ciencias de la Producción y la Salud Animal, desde 2007. Actualmente es candidato al doctorado en Ciencias de la Sostenibilidad con el proyecto “Cadenas de valor de ganadería extensiva: modelo de producción ganadera sostenible del estado de Yucatán”. Es profesor de carrera asociado “C” de tiempo completo en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, de la UNAM, con diecinueve años de trayectoria académica. Su investigación se enfoca en producción pecuaria sostenible y su vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Ha recibido el reconocimiento “Sus Scrofa” y cuenta con PRIDE “C”. Es autor de capítulos de libros y artículos científicos sobre sistemas productivos sostenibles aplicada al sector pecuario mexicano.



GREGORIO NÚÑEZ HERNÁNDEZ

Ingeniero agrónomo zootecnista egresado de la Universidad Juárez de Durango. Cuenta con maestría en Manejo de Forrajes y doctorado en Nutrición Animal por la Universidad Estatal de Nuevo México. Es especialista en nutrición de ganado lechero por el CATIE-IICA y por la Universidad de Cornell, y también investigador del Programa de Forrajes y Bovinos Lecheros en el INIFAP por 36 años. Fue director estatal del INIFAP en el estado de Colima, México, de 1992 a 1994. Fue también coordinador de la Red Nacional de Bovinos de Leche del INIFAP por doce años. Ha sido miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e investigadores por treinta años, así como profesor en su alma máter por igual número de años, asesor privado por más de veinte años y director de empresas agropecuarias por ocho años. Ha recibido múltiples reconocimientos por investigación, academia y dirección de empresas privadas.



RAFAEL OLEA PÉREZ

Licenciado en Medicina Veterinaria y Zootecnia, así como maestro en Reproducción Animal, ambas por la UNAM. Hizo su doctorado en Sustentabilidad por la Universidad de Newcastle Upon Tyne, en Reino Unido. Ha sido académico en Producción Animal, Reciclamiento de Nutrientes, Evaluación del Impacto Ambiental y Ecotecnias para Empresas Pecuarias en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ, de la UNAM). Fue experto técnico como Auditor para los Mecanismos de Desarrollo Limpio (2012-2013) y acreedor al “Reconocimiento especial de apoyo a productores pecuarios-2014”, del Primer Simposium de la Carne del Estado de México, y al segundo lugar en los premios Manuel Cabrera Valtierra-2014, Constantino Ordoñez -2019 y Gustavo Baz Prada-2022, como profesor, asesor y programa de servicio social en área rural, respectivamente. Fue fundador en 2016 del seminario de Ganadería, Sustentabilidad y Cambio Climático en la FMVZ-UNAM, programa que coordina desde entonces. Es integrante de la Red Universitaria de Sustentabilidad, de la UNAM.



JOSÉ DE JESÚS OLMOS COLMENERO

Doctor en Ciencias Lecheras por la Universidad de Wisconsin-Madison. Desde 2005, profesor investigador en el Centro Universitario de Los Altos de la Universidad de Guadalajara. El mayor interés profesional es generar conocimiento regional en la región Altos de Jalisco sobre el manejo de los sistemas de producción de forrajes y leche con énfasis en producción, cosecha, almacenamiento y utilización de los forrajes, así como en nutrición-alimentación del ganado lechero, con la finalidad de contribuir a una producción agropecuaria sustentable de Jalisco y de México



CRISTO OMAR PUENTE VALENZUELA

Científico mexicano especializado en química y toxicología ambiental, con énfasis en suelos y metales pesados. Actualmente, se desempeña en la investigación agrícola y ambiental en el norte de México, particularmente en la región de la Comarca Lagunera. Afiliado al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), donde coordina el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo, Planta y Medio Ambiente del CENID-RASPA en Gómez Palacio, Durango. También colabora con la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), donde lidera el Laboratorio de Química Ambiental. Ha investigado la concentración de metales pesados en matrices biológicas y ambientales, así como la captura de carbono en ecosistemas áridos.



EDGAR EDUARDO PULIDO CHÁVEZ

Doctor en Medicina, Sanidad y Producción Animal y Ciencia de los Alimentos por el Instituto de Ganadería de Montaña, centro mixto entre la Universidad de León (UDL) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. Es profesor investigador en el Centro de Estudios para la Agricultura la Alimentación y el Cambio Climático (CEAACC), en el Centro Universitario de Los Altos (CU Altos) de la Universidad de Guadalajara (U de G). Mi interés profesional y científico se centra en el desarrollo rural y la agricultura para la permanencia de la población rural, la visibilización de su trabajo y mediante la investigación aplicada, contribuir a la sustentabilidad del campo mexicano.



GERARDO FEDERICO QUIROZ ROCHA

Médico veterinario zootecnista, especialista en Patología Clínica Veterinaria y maestro en Ciencias con orientación Patología Veterinaria, todos por la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es también doctor en Veterinary Science por el Ontario Veterinary College, de la Universidad de Guelph. Cuenta con un diplomado en Control y Gestión de la Calidad en Laboratorio Clínico, por la FESC-UNAM, y otro en Bienestar Animal cursado en la FMVZ-UNAM. Sus áreas de interés son las enfermedades metabólicas de las especies domésticas, bienestar animal y su relación con la salud/enfermedad, así como la tenencia responsable de las mascotas y su vínculo con las especies productivas.



ARTURO REYES GONZÁLEZ

Es investigador de tiempo completo en el INIFAP Campo Experimental la Laguna, en el área de manejo de agua. Egresó de la licenciatura como Ingeniero Agrónomo en 2001 y de la maestría en Ciencias de Irrigación en 2003; ambas cursadas en el Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10 de Torreón, Coahuila. Realizó su doctorado en 2017 en la Universidad de Dakota del Sur, EUA, en el departamento de Ingeniería Agrícola y Biosistemas. En reconocimiento a su trayectoria académica, pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e investigadores (SNI) Nivel I y es investigador estatal honorífico. Asimismo, ha sido autor de varios artículos científicos y asesor de tesis de maestría y doctorado en el posgrado del Instituto Tecnológico de Torreón.



SOFÍA DÍAZ RIVERA

Cuenta con una carrera destacada en el ámbito de la sustentabilidad. Egresó de la licenciatura en Marketing del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Santa Fe (ITESM, CSF) y de la maestría en Emprendimiento Ambiental de la Universidad de Strathclyde, en Glasgow. Durante los últimos diez años ha estado a cargo del desarrollo de proyectos de sustentabilidad en Grupo Danone México. Actualmente, es responsable de la estrategia de sustentabilidad, que incluye economía circular, agua, agricultura regenerativa y reducción de CO2 en la cadena de suministro. Ha sido reconocida como una de las treinta promesas de los negocios por parte de la revista Expansión y como una de las sesenta mujeres que trabajan comprometidas por el medio ambiente y la sustentabilidad en México por parte de Empresas Verdes. Es profesora de cátedra de la carrera de Ingeniería en Desarrollo Sostenible en su alma máter.



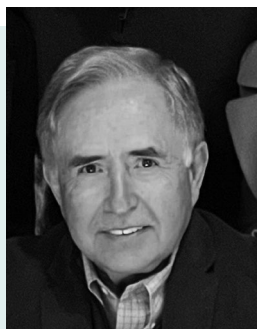
KARLA RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

Médico veterinario zootecnista y maestra en Ciencias de la Producción y Salud Animal por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctora en Ciencias Biológicas con especialización en Ciencias Lecheras-Nutrición de vaquillas por la Universidad Estatal de Dakota del Sur, en Estados Unidos. Fue profesora de asignatura en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM. Desde 2009 es investigadora del INIFAP en el Campo Experimental La Laguna, como parte del programa de investigación en Bovinos Leche. Cuenta con más de quince años de experiencia trabajando con productores de diferentes sistemas de producción de leche, principalmente en la Región Lagunera de Coahuila y Durango, así como en otros estados como Chihuahua, Querétaro, Aguascalientes, Puebla, Jalisco y Veracruz.



FELIPE DE JESÚS RUIZ LÓPEZ

Egresado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, tiene maestría y doctorado por la Universidad de Cornell, de Nueva York. Ingresó al entonces Instituto Nacional de Investigaciones Pecuarias (hoy INIFAP). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Fue director general de la Asociación Holstein de México, donde desarrolló las primeras evaluaciones genéticas y genómicas realizadas en México. Actualmente es director del Centro Nacional de Investigación en Fisiología y Mejoramiento Animal del INIFAP. Es profesor de posgrado en la FESC-UNAM y en la Universidad Autónoma de Querétaro. Es autor y coautor de múltiples publicaciones científicas y asesor de tesis en el área de mejoramiento genético.



JOSÉ MARIANO SALCEDA SERVÍN DE LA MORA

Es Ingeniero Químico egresado de la Facultad de Química de la UNAM, donde fue profesor. Tiene más de 40 años de experiencia profesional desempeñado diferentes funciones en diversas compañías mexicanas y grupos internacionales: Alcan Aluminio, Ceras Johnson, Grupo DESC, Alimentos Del Fuerte. En Danone de México fue Vicepresidente de Desarrollo de Negocios, y responsable de diversos proyectos e iniciativas que concretaron el desarrollo de proveedores locales e internacionales que generaron más de 7,500 empleos directos e indirectos y una cifra de negocio superior a los 9 mil millones de pesos. Fue líder fundador del proyecto Margarita Danone durante 10 años, nuevo modelo de negocio sustentable para producción y abastecimiento de leche fresca de calidad en pequeños productores de nivel socioeconómico muy bajo en comunidades rurales. Fue Presidente de la Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC). Actualmente preside el despacho de consultoría MS&MS Consulting.



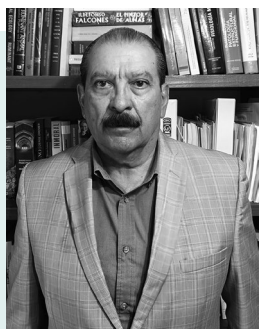
JUAN ISIDRO SÁNCHEZ DUARTE

Investigador en forrajes y nutrición de ganado lechero en el INIFAP de Matamoros, Coahuila, México. Perteneció al Sistema nacional de Investigadores Nivel 1. Ha trabajado en la preservación de forrajes mediante ensilado y en la evaluación de su calidad nutritiva para ganado bovino lechero. Adicionalmente, es el responsable técnico de la evaluación experimental y semicomercial de maíces y sorgos forrajeros para las compañías de semillas en la Comarca Lagunera evaluando el potencial de rendimiento y la calidad nutritiva.



RUBÉN SANTOS ECHEVERRÍA

Médico veterinario zootecnista por la Universidad Autónoma de Guerrero, maestro en Ciencias de la Reproducción Animal por la Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y doctor en Ciencias en el Programa en Ciencias de la Producción y de la Salud de esta misma institución. Actualmente, es investigador en el Programa Leche de Bovino del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y director del Centro de Investigación Regional Golfo Centro de la misma institución.



SERGIO SOLTERO GARDEA

Es ingeniero zootecnista por la Universidad Autónoma de Chihuahua (1978), así como maestro en Ciencias (1987) y doctor en Filosofía (1991) por la Texas Tech University. Su trayectoria profesional inicia en 1979 en el Instituto Nacional de Investigaciones Pecuarias (INIP) y posteriormente en INIFAP hasta 1995. Fue director de desarrollo pecuario en el Gobierno de Jalisco hasta 1997. En 1998, inicia su gestión al frente del Consejo para el Fomento de la Calidad de la Leche y sus Derivados (COFOCALEC). Actualmente, es secretario técnico en la Comisión Ejecutiva Bovinos Leche (CEBL) y coordinador del TC35/SC5 "Milk and milk products" del Comité Mexicano para la atención de ISO.



ADOLFO KUNIO YABUTA OSORIO

Egresado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México y maestro en Ciencias por la misma institución. Ha impartido asignaturas como Propedéutica, Clínica Bovina, Zootecnia General, Producción de Bovinos Lecheros, Zootecnia de Bovinos de Leche y, actualmente, Zootecnia de Bovinos de Carne. Su formación complementaria incluye un internado en Medicina y Clínica Bovina, diplomados en Transferencia de Embriones, Producción de Carne en Corral de Engorda, y un curso en cría, nutrición, reproducción y manejo de ganado lechero como becario del Ministerio de Relaciones Exteriores de Israel, así como un curso internacional en Cirugía y Obstetricia Bovina en Bélgica. Ha participado en la publicación de libros, manuales y artículos científicos, y colabora en proyectos orientados al mejoramiento de la enseñanza veterinaria y zootécnica. Desarrolla materiales didácticos y casos prácticos que fortalecen la formación de estudiantes con un enfoque integral, técnico y contextual. Imparte asignaturas teóricas y prácticas en licenciatura, fomentando el pensamiento crítico y el análisis económico-productivo de los sistemas pecuarios. Su labor docente se caracteriza por el uso de metodologías interactivas, herramientas digitales y una visión crítica y actualizada de la producción animal.

1

IMPORTANCIA DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA LÁCTEA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

Everardo González Padilla¹

José Luis Dávalos Flores¹

Rafael Olea Pérez¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



La adopción de un desarrollo sostenible en la cadena láctea no implica sólo y exclusivamente “tecnología”, sino también un compromiso ético, una oportunidad de devolver el amor social al paisaje rural y que la huella del sector ante el cambio climático no sea negativa

El ser humano, en atención a la satisfacción de sus necesidades, ha generado un enorme impacto en los recursos naturales del planeta y en el cambio climático. Originalmente, desde hace alrededor de dos millones de años, con la aparición de los primeros homínidos en África y Eurasia y hasta hace unos 800 mil años, con el dominio del fuego por estas especies (Domesticación del fuego, 2024), esas comunidades vivieron como parte de los ecosistemas, de la caza y la recolección, sin ocasionarles perturbaciones mayores y en equilibrio con el desarrollo de las diferentes especies, adaptándose al ambiente en que vivían y reproduciéndose y evolucionando en función de su capacidad de adaptación. Sólo tomaban del medio lo indispensable para vivir y reproducirse, como el resto de los organismos vivos con los que compartían el mismo espacio.

Esa misma tendencia se mantuvo con la aparición del *Homo sapiens*, que se dispersó a partir de África y colonizó la mayor parte del mundo, incluyendo Europa y el resto de los continentes (National Geographic, 2022). El gran cambio vino con la llamada Revolución Neolítica, en la que la domesticación de plantas y animales modificó profundamente la forma de vida de los humanos; el controlar el acceso de manera predecible a sus alimentos les permitió sedentarizarse y formar pequeños núcleos de población, generalmente al margen de ríos o muy cerca del abastecimiento de agua dulce.

Fue así como se comenzaron a formar culturas y formas de comunicación cada vez más sofisticadas, así como sociedades estratificadas con especializaciones laborales, establecimiento de reglas de convivencia, formas de go-

bierno, comercio entre comunidades y criterios básicos de economía (Demografía prehistórica, 2025). A partir de ahí, se comenzaron a establecer acciones para adaptar el medio a las necesidades de las poblaciones e individuos, lo que modificó el proceso de evolución de la especie, imponiendo a la selección natural principios de selección impulsada por criterios distintos, definidos por el hombre, transformando a nuestra especie en el mamífero más exitoso y difundido en el planeta.

La especie humana modificó su relación con la naturaleza y comenzó a extraer recursos naturales para satisfacer las nuevas necesidades que fue creando en aras de bienestar y de la satisfacción de su alimentación, vestido, alojamiento, defensa e interacción comunitaria. La acción humana modificó la forma de vida natural de diferentes especies vegetales y animales, aumentó las poblaciones relativas de las que mejor satisfacían sus demandas y estableció criterios de selección que modificaron su evolución natural.

Por otra parte, se generalizó el uso de la leña y carbón como fuentes de energía (Energy Institute, 2024), y se estima que desde hace alrededor de nueve mil años se comenzó a utilizar la energía eólica para molinos y velas de embarcaciones (Martín de la Plaza, 2024). Asimismo, se estima que la leche es uno de los alimentos más antiguos en la dieta de los seres humanos. Existe evidencia de su consumo desde hace aproximadamente 7000 años a. C., pues incluso ya se ordeñaban animales antes de haberse iniciado la práctica de la agricultura en el Cercano Oriente y norte de África (CANILEC, 2024).

El ser humano ha generado un enorme impacto en los recursos naturales del planeta y en el cambio climático para poder satisfacer sus necesidades

Desde luego, el tamaño de la población humana, las necesidades que satisfacía y el crecimiento poblacional eran diminutos en comparación con los recursos disponibles en la superficie del planeta; no había necesidad ni existían los medios para aprovechar lo que estaba bajo tierra. Se estima que, cerca de 10,000 años a. C., la población mundial de seres humanos era de aproximados tres millones (Demografía prehistórica, 2025) y vivían en pequeñas comunidades agrarias. Es hasta alrededor del año 3,500 a. C. que se registra la fundación de la primera ciudad, Uruk, al sur de Mesopotamia, que 500 años después llegó a tener alrededor de 70,000 habitantes (Kriwaczek, 2014). Las ciudades comenzaron a florecer y con ello hubo una mayor estratificación de las sociedades y mayor presión al agro para llevar alimentos a esas poblaciones que no participaban en su producción.

En un gran salto en el tiempo, el hecho más relevante para fines del uso de los recursos del planeta por los humanos ocurrió a mediados del llamado Siglo de las Luces (XVIII), con la primera etapa de la Revolución Industrial y su impacto en los procesos de transformación de una economía fuertemente agraria a la industrial, con el aumento de las poblaciones urbanas que no producen sus alimentos y las modificaciones en la matriz energética que se requirió para la operación de las nuevas máquinas y la red de comunicación para la distribución de los productos que de pronto comenzaron a ser accesibles a más y más personas que se encontraban a mayores distancias de los sitios de producción.

A principios de la segunda etapa de la Revolución Industrial, en 1859, se excavó el primer pozo petrolero y de ahí los combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural comenzaron a cobrar más importancia (UNAM, 2020), sobre todo desde principio del siglo XX con los motores de combustión interna y los automóviles movidos con combustibles fósiles. Hoy, esos tres combustibles fósiles

representan 82% de la energía que se utiliza en el mundo (IEA, 2023).

Por otro lado, el crecimiento de la población humana, su migración a ciudades cada vez más grandes y el mejoramiento del poder adquisitivo, presionaron al agro con el aumento de la demanda de alimentos, sobre todo los de origen animal, e impulsaron el crecimiento de actividades agropecuarias basadas en más animales, cambios de uso del suelo con la incorporación de mayores superficies para uso agropecuario y el desarrollo de sistemas cada vez más intensivos de producción agrícola y ganadera, con mayores requerimientos de agua, energía y la concentración, en pequeñas superficies, de residuos de insumos para la producción y desechos potencialmente contaminantes, que en muchas ocasiones rebasaron la capacidad del planeta para procesarlos y contaminaron cuerpos y corrientes de agua.

Adicionalmente, transformar los productos primarios en alimentos y llevarlos del campo a la industria agroalimentaria y de ahí al sistema de distribución para después ponerlos en la mesa de los consumidores finales, representa también un considerable consumo de energía que contribuye con impactos negativos al ambiente. El crecimiento demográfico y la migración del campo a las ciudades en busca de mejores servicios y condiciones de vida ha contribuido a agudizar el problema de la contaminación, tanto por las necesidades de movilización de alimentos y el traslado cotidiano de personas de su casa a las actividades que realizan, como por el acondicionamiento del confort en las viviendas, el cambio de usos del suelo y la disrupción de ambientes naturales para los asentamientos humanos y la infraestructura para comunicación.

El crecimiento poblacional experimentado en el siglo XX por el rápido incremento en la esperanza de vida,

auspiciado por los procesos de urbanización y los avances médicos, alcanzó su máximo en el mundo con una tasa de 2.1% anual en 1968 (Banco Mundial, 2024), aunado al aumento de la población urbana, que pasó de 33% a 57% entre 1960 y 2023 (Banco Mundial, 2024b). Esto planteó demandas de bienes y servicios con un ritmo mayor al desarrollo de opciones tecnológicas para atenderlas de forma sostenible sin causar daños colaterales al ambiente y los recursos naturales. Para el caso de México, el crecimiento demográfico rebasó el 3% anual en la década de 1960 (INEGI, 2001) y la población urbana pasó de 51% en 1960, a 82% en la actualidad (Banco Mundial, 2024b). En paralelo, con esos cambios en el mundo y en México, y lo que implicaron para mantener el paso en la atención de la demanda de todo tipo de satisfactores en rápido crecimiento, el uso de combustibles fósiles ha crecido de 1950 a la fecha unas ocho veces (IEA, 2023).

Esas señales y las teorías malthusianas de 1798 sobre los catastróficos impactos del crecimiento descontrolado de poblaciones (Malthus, 1826), amén de la conciencia sobre la finitud de los recursos del planeta, promovieron una serie de documentos, algunos catastrofistas, que preocuparon lo suficiente a los miembros del Club de Roma para tomar cartas en el asunto y encargar al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) coordinar un estudio, con 17 expertos de seis países, aprovechando un modelo que se había desarrollado recientemente, sobre las posibles consecuencias para el género humano y el planeta, de continuar con las tendencias de crecimiento demográfico y del consumo de los recursos finitos de la tierra.

El documento “Los Límites del Crecimiento” de 1972 (Meadows H.D. et al, 1972), señalaba que la extralimitación del uso de recursos naturales podía llevar a su progresivo agotamiento; el colapso de la producción agrícola e industrial y un decremento abrupto de la población humana. Recomendaba inducir un equilibrio global cuidando solamente satisfacer las necesidades de cada persona a fin de que pueda desarrollar su potencial como ser humano. El documento fue la base para la Declaración de Estocolmo de la Conferencia de Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente Humano, celebrada en Estocolmo en junio de 1972 (Naciones Unidas, 1972; Gobierno de México: Educación Ambiental, 2021).

A partir de esas acciones se promovió la atención al impacto ambiental de las diversas actividades humanas y la Comisión Mundial Sobre el Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas encargó un análisis minucioso del tema

bajo la coordinación de la primera ministra de Noruega, Gro Harlem Bruntland, que se denominó: El Informe Bruntland “Nuestro Futuro Común” de 1987 (World Commission on Environment and Development, 1987) que definió el término desarrollo sostenible. Entonces la conciencia colectiva sobre el impacto ambiental de las actividades humanas y la premura para su atención en términos de prevención, mitigación y remediación es ciertamente reciente.

A partir de esos documentos se generaron muchos otros que han dado seguimiento a lo que ha venido ocurriendo, como “Más allá de los límites del crecimiento”, de 1992; “Los límites del crecimiento 30 años después”, de 2004; “*Les limites à la croissance, dans un monde fini*”, de 2012, por mencionar algunos (Meadows et al., 1993, 2006 y 2022). A partir de la alerta que desató el reconocer los cambios que se daban en la atmósfera terrestre y las modificaciones de la temperatura en la superficie, han existido consensos mundiales para limitar las acciones que contribuyen al cambio climático, la contaminación ambiental y la pérdida de biodiversidad.

Así, en 1988 se estableció un Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, que fue ratificado por la Asamblea General de Naciones Unidas (IPCC, 2025). Ese panel de expertos revisa y evalúa la información científica disponible para emitir una opinión objetiva, basada en ciencia, sobre lo que ocurre con el cambio climático, las medidas de mitigación y adaptación, y la metodología para que cada país realice la evaluación de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sus sumideros o captura, con el fin de monitorear el balance de las contribuciones de los diferentes países y regiones, por fuentes y actividades económicas.

Ese panel definió qué actividades serían consideradas como antropogénicas y entre ellas se incluyeron la agricultura, la ganadería, la forestería y los cambios de uso del suelo. Cada país reporta periódicamente las emisiones de cada contaminante y los diferentes GEI se expresan en equivalentes a dióxido de carbono (CO₂) como patrón estándar. Este gas se había descrito con capacidad potencial de GEI desde 1856 por la investigadora norteamericana Eunice Newton Foote y presentado en la American Association for the Advancement of Science – por Joseph Henry, porque las mujeres no podían presentar trabajos en esa época– y ratificado por John Tyndall en 1859, que describió que el CO₂, el metano (CH₄) e incluso

En las actividades agropecuarias las mayores emisiones de GEI provienen del sistema digestivo de los rumiantes

el vapor de agua pueden bloquear la radiación infrarroja (Eunice Newton Foote, 2025).

El IPCC ha señalado que los principales GEI antropogénicos son el CO₂, el CH₄ y el óxido nitroso (N₂O); en el reporte de su Quinta Evaluación indica que las actividades relacionadas con la agricultura, la forestería y otros cambios en el uso del suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) se constituyen en importante emisor de GEI, detrás del sector eléctrico y de generación de calor (Cubash *et al.*, 2013). Los GEI antropogénicos más importantes emitidos por la agricultura son el CH₄ (60% de los GEI de la agricultura a nivel mundial), el N₂O (30%) y el CO₂. Las fuentes agropecuarias de dichos GEI son:

1. El metano, el cual se genera a partir de: a) fermentación ruminal, b) manejo de estiércol, c) quema de residuos agrícolas y vegetativos, y d) cultivo de arroz.
2. El óxido nitroso, que se genera a partir de: a) manejo de suelos (fertilización química, etcétera), b) manejo de estiércol, y c) quema de residuos agrícolas y vegetativos.
3. El dióxido de carbono¹ se genera a partir de: a) encalado de suelos ácidos, y b) aplicación de urea (Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases, 2023).

Si bien se reconoce que en las actividades agropecuarias las mayores emisiones de GEI provienen del sistema digestivo de los rumiantes, sobre todo de los bovinos por el metano que se produce por la fermentación ruminal y su eliminación a través de eructos, ventosidades y por el manejo de las heces fecales, es importante destacar, como se discute a continuación, que a pesar que el metano que se produce en el rumen viene de la fermentación de cadenas hidrocarbonadas que se sintetizan por fotosíntesis utilizando CO₂ y generando oxígeno, en un ciclo biológico

del carbono, por convención, se estandariza y compara igual que la mayor parte de los GEI que se producen de actividades económicas que implican la extracción y oxidación de hidrocarburos fósiles que no forman parte de ciclos naturales del ambiente actual.

La realidad y los peligros que impone para toda la humanidad el calentamiento global y la pérdida de biodiversidad, hacen que cada sociedad y sector que contribuye al problema, aún en proporciones minúsculas o con las diferencias señaladas en el párrafo anterior, tenga la obligación de hacerse cargo de trabajar para minimizar el impacto ambiental en el ámbito de su competencia y buscar un balance cero. En el caso de la lechería, como en otras actividades que satisfacen necesidades primarias para una vida saludable, es doblemente importante lograr un balance entre lo que significa para la humanidad lo que aporta la actividad y su impacto ambiental.

Según las perspectivas 2023 de la Agencia Internacional de Energía, hoy la temperatura media mundial de la superficie terrestre ya está alrededor de 1.2 grados centígrados encima de los niveles preindustriales, lo que provoca olas de calor y otros fenómenos meteorológicos extremos, sin que las emisiones de GEI hayan alcanzado todavía su punto máximo (IEA, 2023). Desde la era preindustrial en 1850 hasta nuestros días, el dióxido de carbono ha aumentado un 47.3%; el metano a su vez se sitúa en 1,866 ppm con un incremento de 157.8% (IPCC, 2023). Las emisiones antropogénicas netas de GEI en 2019 fueron de 59±6.6 GtCO₂-eq⁹, cifra 12% mayor a la de 2010 y 54% mayor a la de 1990 (IPCC, 2021).

Se están haciendo grandes inversiones para el desarrollo de energías limpias y la meta es no rebasar 1.5 grados centígrados. Es indispensable que todos hagamos responsablemente la tarea en el ámbito de nuestra competencia y

¹ Sólo se incluye el CO₂ de estricta generación en el proceso primario agrícola, y no los indirectos por consumo de combustibles fósiles o de generación de otros insumos para la agricultura (electricidad, etcétera).



fomentar y aplicar la investigación y el desarrollo tecnológico para generar opciones viables para aspirar a una actividad neutra o con un impacto ambiental que pueda ser absorbido o compensado con procesos naturales.

La agricultura es un sector económico indispensable para el logro de un desarrollo sostenible y, como se indicó previamente, si bien es emisor de GEI, éstos son producto del ciclo del carbón presente en la troposfera y no por extracción de hidrocarburos fósiles. De esta forma, el ajuste y adopción de estrategias y tecnologías que retomen o redirijan las actuales emisiones de GEI al ciclo biológico de carbón entre las fases naturales de suelo-planta-animal-suelo son las mejores medidas para contribuir en la actual tarea mundial.

Para la primera década del presente siglo, ya vivimos evidencias claras y documentadas de modificaciones climáticas inducidas por la actividad económico-productiva del ser humano. Es claro entonces, que sólo pensar en estrategias de mitigación de GEI ya no es suficiente, por lo que dos mecanismos más han sido acordados internacionalmente: la adaptación al cambio climático y el fortalecimiento de la resiliencia, entendiendo esta última como la capacidad de afrontar los embates ambientales, económicos y sociales que generan el cambio climático y poder retornar al *estatus quo* con contribuciones positivas al ambiente (Naciones Unidas: Acuerdo de París, 2015).

Es en este contexto que cualquier actividad económico-productiva tiene que pensar en adoptar un desarrollo

sostenible, que aboga no sólo por reducir la huella de emisiones, sino también por el fortalecimiento de sumideros de carbón que además doten de mecanismos de amortiguamiento para fenómenos climáticos cada vez más intensos o prolongados. Se requieren innovaciones tecnológicas y de interacción con la comunidad que fomenten la cohesión con la sociedad, tengan mayor versatilidad productiva y adopten alternativas con beneficios al ambiente.

La emisión de GEI asociada a la producción lechera primaria ocurre básicamente en dos niveles:

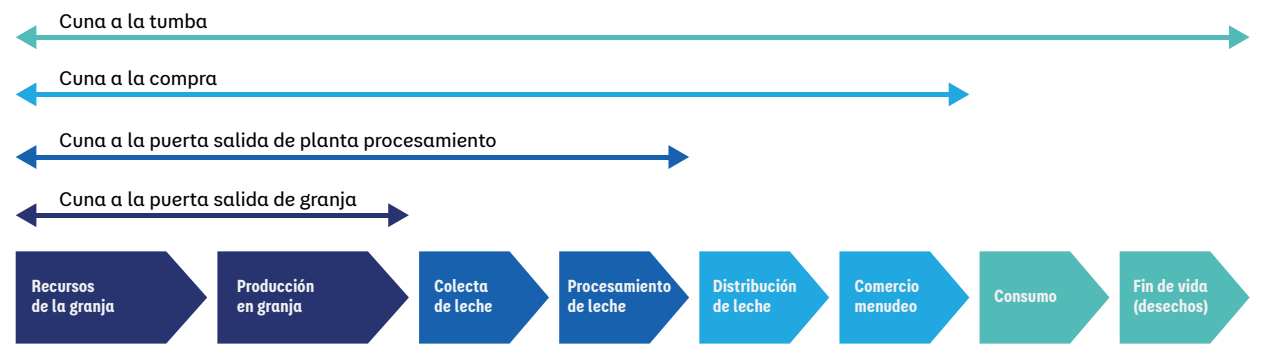
- 1) En la generación de insumos requeridos para:
 - a) La alimentación animal: producción de fertilizantes y alimentos (CO_2 y N_2O).
 - b) La operación de la granja: combustibles y electricidad (CO_2 y CH_4).
- 2) La producción *in situ* en la granja para:
 - a) La fermentación entérica del bovino (CH_4), que es el mayor generador de GEI de la actividad.
 - b) El almacenamiento de estiércol (CH_4 y N_2O).
 - c) La aplicación de fertilizantes (N_2O y CO_2).

Sin embargo, la actividad lechera también contribuye al secuestro de carbono a través de su incorporación a la materia orgánica del suelo en las zonas de cultivo. La Federación Internacional de Lechería (IDF, por sus siglas en inglés), que es el organismo internacional más reconocido que aglutina a los diferentes actores del sector lácteo, publicó su estándar de la huella de carbono para la cadena láctea (IDF, 2022), alineada con los principales estándares reconocidos relacionados al tema con foco en la huella de CO_2 . Los cuatro pasos que la IDF acota a seguir para medir la huella de CO_2 de la actividad lechera son:

- 1. Establecer la meta y alcance del análisis del ciclo de vida del carbono. En este punto, se destacan ocho estadios genéricos en el ciclo de vida de la producción láctea (gráfica 1).
- 2. Colecta de datos para el análisis de inventarios.
- 3. Evaluación del impacto (cálculo de la huella de CO_2).
- 4. Interpretación de los datos.

El sector lácteo a nivel mundial ha venido trabajando con diversas propuestas que han ido creciendo y madurando de acuerdo con cada región. En forma práctica, para México, quiere decir que la descarbonización del sector

Gráfica 1: Los 8 estadios genéricos del ciclo de vida de los productos lácteos



Fuente: IDF, 2022

lácteo es una parte importante para adoptar un desarrollo sostenible, donde la tecnología, la ética y el amor a la tierra y los animales son los instrumentos para incidir en la gran diversidad de formas y climas donde se produce y consume leche de vacuno en el país. La importancia que se le dé a la mitigación, adaptación o resiliencia en la producción láctea no será igual en todo el país; de igual forma, la tecnología de producción no puede ser igual en municipios con alta densidad de ganado lechero, como los de la Comarca Lagunera o el noroccidente del país y

en otros con un desarrollo distinto, como en las pequeñas lecherías familiares de la costa veracruzana o de Los Altos de Jalisco.

A manera de ejemplo, el aprovechamiento del valor energético del estiércol, que es una piedra angular para reducir la huella de carbono de la leche, pareciera que sólo es posible a través de instalar y operar un reactor anaerobio, tecnología que requiere contar con capacidad de inversión y operación que no todos los establos tienen. Cuando la escala de producción limita la inversión, no

necesariamente tiene que limitar la ética y el amor a la tierra. Así siguiendo el ejemplo de reducir la huella de carbón al aprovechar los compuestos a base de carbón del estiércol, en prácticamente todos los establos, pudiera usarse el estiércol como mejorador de la textura y fertilidad de suelos, que a la vez que contribuye a mantener los sumideros y/o almacenes de carbón.

Como este ejemplo, el libro abordará en sus diferentes capítulos alternativas no sólo tecnológicas, sino algunas simplemente reflexivas que implican el romper paradigmas de rutinas, hábitos o manejos. Para el caso de México, cobra también gran importancia en la sostenibilidad de

su sector lácteo el manejo racional del recurso hídrico, el cual es escaso en nuestro país y por ello se ha incluido un capítulo específico.

Con este enfoque, la adopción de un desarrollo sostenible en la cadena láctea no implica sólo y exclusivamente “tecnología”, sino también un compromiso ético, una oportunidad de devolver el amor social al paisaje rural y que la huella del sector ante el cambio climático no sea negativa, sino de restablecimiento del reconocimiento de su contribución tanto a la nutrición humana como al bienestar de los animales y a la restauración del planeta.

Referencias

Banco Mundial. 2024. Crecimiento mundial de la población.

Banco Mundial. 2024 b. Población urbana (% de la población total) – México.

Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC). 2024. Historia de la leche y sus derivados en México. CANILEC – Ámbar Editores. México

Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.G. Winther, (2013). Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Demografía prehistórica. 2025. Wikipedia.

Domesticación del fuego. 2024. Anónimo en referencia a Universidades Israelíes. Wikipedia.

Energy Institute (EI). 2024. Statistical review of world energy.

Eunice Newton Foote. 2025. Wikipedia.

Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. 2024. Introduction to the science behind agricultural GHG inventories.

Gobierno de México: Educación Ambiental. 2021. Declaración de Estocolmo sobre el medio ambiente. Conferencia de Naciones Unidas sobre el medio ambiente humano. 16 de junio de 1972.

Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), 2025. Historia del IPCC.

IDF (2022). The IDF global carbon Footprint standard for the dairy sector. Bulletin 520, 2022. International dairy Federation (ed.), Brussels.

International Energy Agency (IEA). 2023. World Energy Outlook, 2023.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2001. Indicadores sociodemográficos de México (1930-2000).

IPCC (2023). Climate science 2030. En: https://climatescience2030.com/es/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=traffic-ipccar6&utm_content=typ-text__adn-google%20search%20es__aud-4.2&utm_term=ipcc&gclid=Cj0KCQjw27mhBhC9ARIsAlFsETGZdFCdJd7nxNpJWj4u5FrsmEFxxKKbu0YnEWoiAG7juvKpAcvfgYaAml8EALw_wcB

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Kriwaczek, P. 2014. Mesopotamia and the birth of Civilization. Thomas Dunne Books.

Malthus, T.R. 1826. An essay on the principle of population. Sixth Ed. Vol I. London. Jhon Murray; Albemarle Street.

Martín de la P. A. 2024. Historia de la energía eólica: del origen a la actualidad. BBVA.bbva.com/sostenibilidad/historia-de-la-energia-eolica-del-origen-a-la-actualidad/

Meadows, H.D., Meadows, L.D., Randers, J. y Behrens W.W. 1972. Los límites del crecimiento. Informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad. Primera Ed. Fondo de Cultura Económica, México.

Meadows H.D., Meadows L.D. y Randers J. 1993. Más allá de los límites del crecimiento. Círculo de Lectores 978 – 8422645368.

Meadows H.D., Randers J. y Meadows L.D. 2006. Los límites del crecimiento 30 años después. Galaxia Gutenberg. Círculo de Lectores. 978-84-8109-601-9.

Meadows D., Meadows D & Randers J. 2022. Les limites à la croissance (dans un monde fini). Collection L'époque. 978-2-37425-332-9.

Naciones Unidas. 1972. Conferencias: medio ambiente y desarrollo sostenible. Estocolmo, 5 al 16 de junio.

Naciones Unidas. 2015. Acuerdo de París. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

National Geographic. 2022. ¿Cuál es el origen de la humanidad según la ciencia? National Geographic/2022/12

UNAM. 2020. HistoriadePetroleo.unam.mx/gvazquez/geoquimpetrolFI/zonadesplegar/clases/clase%207%20historia%20%20avances.pdf

World Commission on Environment and Development. 1987. Our common future. United Nations.

2

EL VALOR NUTRICIONAL DE LA LECHE Y LOS DERIVADOS LÁCTEOS

Paola Barrios Trejo¹

María del Pilar Milke García¹

¹Departamento de Hematología

Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición

“Salvador Zubirán”



Los productos lácteos son importantes fuentes de calcio, proteínas, potasio y fósforo, y aportan alrededor de 52 a 65% de la ingestión diaria recomendada de calcio

La leche es la secreción de las glándulas mamarias de los mamíferos para alimentar a sus crías y asegurarles un correcto crecimiento y desarrollo. El término *leche* se debe utilizar únicamente para designar la secreción mamaria que excluye la secreción láctica (quince días antes y cinco días después del parto) o calostro. De igual manera, se deben excluir los productos vegetales mal nombrados *leches*, que son en realidad bebidas que, en el mejor de los casos, simulan la composición de la leche y que son elaboradas a partir de soya, almendra, coco, avena y avellana, entre otros ingredientes (Pereira, 2014).

Este alimento es un componente básico de la dieta de 6 mil millones de personas y su consumo varía de 10 a 212 litros por persona al año (desde dos cucharadas hasta más de dos tazas al día), dependiendo del país. La principal fuente de consumo de leche para el humano es la de origen bovino, pero también son aptas la de cabra, oveja, yegua, camella, burra y foca. Los derivados o productos lácteos como la crema, mantequilla, yogur, queso y kéfir son consumidos de igual manera mundialmente (Visioli y Strata, 2014).

La leche y sus derivados han sido parte importante de la dieta de los humanos desde hace aproximadamente 8,000 años y forman parte de las recomendaciones nutricionales en diversos países (Rozenberg *et al.*, 2016). Son una buena fuente de lípidos, proteínas, aminoácidos, lactosa, vitaminas y minerales; también contiene inmunoglobulinas, hormonas, factores de crecimiento, citocinas, nucleótidos, péptidos, enzimas y otros componentes bioactivos (Haug,

Høstmark y Harstad, 2007). Los productos lácteos son importantes fuentes de calcio, proteínas, potasio y fósforo, y aportan alrededor del 52% a 65% de la ingestión diaria recomendada de calcio (Rozenberg *et al.*, 2016).

En los últimos años ha habido una disminución en el consumo de la leche, principalmente porque han surgido cuestionamientos sobre su necesidad (“el ser humano es el único mamífero que sigue consumiendo leche a lo largo de su vida”) y los efectos en la salud, principalmente asociados al riesgo de desarrollo de enfermedades cardiovasculares debido a su contenido de ácidos grasos saturados o a otros componentes en el caso de diabetes y cáncer (Pereira, 2014), aunque nada de esto se ha comprobado con el debido rigor científico y, de hecho, se ha llegado a refutar e incluso a hablar de la utilidad de la leche en la prevención de la obesidad (Fuentes Uribe, Morales y Valenzuela, 2021) e hipertensión (Soedamah-Muthu *et al.*, 2012).

Funciones de la leche

La leche de vaca está compuesta generalmente de un 87% de agua, 4% a 5% de lactosa, 3% de proteína, 3% a 4% de lípidos, 0.8% de minerales y 0.1% de vitaminas (Pereira, 2014), por lo que es una excelente fuente de nutrimentos para el crecimiento y desarrollo de los niños y la salud en adultos. La leche es el único alimento por antonomasia para el ser humano, es decir, diseñado específicamente para serlo. Los demás alimentos se han denominado como tales al ser seleccionados por los diferentes grupos humanos.

La función específica de la leche es ser alimento en los primeros días o meses de vida de los mamíferos, ya que su composición coincide con las necesidades de esa cría para lograr su crecimiento. En muchos casos, la leche se propone como un alimento que contribuye de manera importante en el desarrollo; también fortalece huesos y dientes, aumenta masa muscular, ayuda a regular la presión arterial y tiene propiedades antimicrobianas, antioxidantes e inmunológicas.

Usos alimentarios y no alimentarios de la leche

La leche se utiliza frecuentemente como bebida en su forma natural o combinada con otros ingredientes como cocoa, saborizantes, frutas, helado, azúcar, entre otros ingredientes. También se utiliza en la elaboración de muchos platillos en repostería, como pasteles y panqués, al igual que en sopas, cremas, aderezos, purés, entre otros. Asimismo, los derivados lácteos se utilizan como complementos en platillos, como los postres, o por sí solos.

La leche y sus componentes también tienen aplicaciones en otras industrias no alimentarias, como en la fabricación de materiales plásticos, fibras textiles, pegamentos y en la producción de etanol. Muchas de estas aplicaciones se deben a las propiedades estructurales o funcionales de algunos componentes específicos. La caseína, principal proteína de la leche, ha sido utilizada desde el siglo XIX como adhesivo de madera, vidrio y papel. Después de su acidificación y solubilización en medios alcalinos, la caseína forma polímeros que se utilizan como espumas protectoras, revestimientos de papel, adhesivos, pegamentos, fibra textil, cosméticos (recubrimiento) o plásticos desechables. Se utiliza de igual manera en pinturas o tintas debido a su solubilidad y capacidad de unir pigmentos.

En cuanto a las demás proteínas de suero, se utilizan en el recubrimiento de papel para conferirle una buena apariencia y capacidad de impresión. También se utilizan como sustitutos en la formulación de cremas. En cuanto a la fracción lipídica, se utiliza en la industria de cosméticos para el cuidado de la piel, cremas y champús. La lactosa se utiliza principalmente como ingrediente alimenticio o en fórmulas infantiles, en la industria farmacéutica (recubrimiento, relleno y excipiente de fármacos) y como sustrato para fermentación. Por último, los efluentes lácteos industriales se desechan en los sistemas de drenaje o se usan sin ningún tratamiento como alimento

para animales (rumiantes) y fertilizantes agrícolas (Audic, Chaufer y Daufin, 2003).

Factores que afectan la composición de la leche

La composición de la leche es de gran importancia para los productores y consumidores, pero existen diversos factores que modifican principalmente su contenido de agua, lípidos, proteínas, lactosa y minerales. La fracción lipídica es el componente más variable en la leche en cantidad y composición de ácidos grasos, y puede constituir entre un 3% y un 5%, lo que afecta las propiedades físicas, la calidad y las características organolépticas de la leche (Razzaghi, Ghaffari y Rico, 2023). Entre los factores que pueden afectar la composición se encuentran principalmente la raza de la vaca, la crianza selectiva y la modificación genética, aunque también de la alimentación. Así:

Raza bovina: afecta principalmente la fracción lipídica y en menor medida la cantidad de lactosa debido a los antecedentes genéticos (Linn, 1988).

Lactancia: el porcentaje de grasa también varía según la etapa de lactancia, siendo más alto en el calostro, para posteriormente disminuir durante los primeros dos meses de lactación y aumentar a medida que ésta avanza. Las proporciones de ácidos grasos también se modifican durante la lactancia: en un inicio aumentan los de cadena corta e intermedia, mientras que los de cadena larga disminuyen. En cuanto a la fracción de proteína, el calostro tiene un alto contenido de proteína y especialmente inmunoglobulinas (el doble de caseína, β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina), pero su concentración disminuye y luego aumenta la concentración de proteínas conforme avanza el periodo de lactación. La cantidad de minerales sigue la misma curva de la grasa y la proteína (Linn, 1988).

Edad: en vacas mayores a tres años disminuye el contenido de proteína, especialmente la fracción de caseína, pero también en las proteínas de suero; esto debido deterioro del tejido de la ubre y el aumento en la incidencia de mastitis (Linn, 1988).

Factores ambientales: se ha observado una disminución de la fracción lipídica de 0.4% en los meses de verano en comparación con los meses de invierno; el ácido palmítico tiende a desarrollar una menor concentración que los ácidos esteárico y octadecanóico que durante los meses más fríos (Linn, 1988). En temperaturas mayores a 24°C, las vacas aumentan su tasa respiratoria y reducen el consumo

La leche fortalece huesos y dientes, aumenta masa muscular, ayuda a regular la presión arterial y tiene propiedades antimicrobianas, antioxidantes e inmunológicas

de alimentos, lo que causa una disminución en el contenido de proteína, lactosa y lípidos. En cuanto a las bajas temperaturas, existe un aumento de 22-31% del consumo de alimento, aumenta el tiempo de rumia, disminuye la tasa respiratoria y la secreción de leche (Razzaghi, Ghaffari y Rico, 2023).

Ordeña: el porcentaje de grasa aumenta continuamente durante la ordeña, ya que se extrae primero la leche con menor contenido de grasa, y al finalizar la leche con mayor contenido de ésta. Esto debido a la acumulación de los glóbulos de grasa en los alvéolos. De esta forma, si la vaca no se ordeña completamente, el porcentaje de grasa será menor de lo normal y la siguiente ordeña será mayor de lo esperado. En cuanto al número de ordeñas en el día, varios estudios han demostrado disminuciones en el porcentaje de grasa, mientras que otros no informan cambios (Linn, 1988).

Mastitis: las vacas que presentan mastitis tienen un porcentaje menor de grasa (aproximadamente de 10%), lactosa y caseína (15%, aproximadamente). También existe una variación en el aumento de ácidos grasos libres y ácidos grasos de cadena corta. Durante la mastitis hay una ligera disminución en el contenido de proteínas, pero un cambio drástico en su composición: se observa un aumento en las proteínas del suero (caseínas, β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina) y una reducción en el contenido de caseína (Poławska *et al.*, 2012). Con respecto a los minerales, existe un aumento de los porcentajes de sodio y cloro, mientras disminuye el porcentaje de potasio y calcio (Linn, 1988).

Hormonas: la hormona de crecimiento en dosis bajas (5-10 UI/día) puede disminuir el porcentaje de grasa, mientras que en una dosis alta (50-100 UI/día) puede aumentarlo (Linn, 1988).

Estrés: el estrés social, fisiológico o psicológico puede alterar la fracción lipídica. Los cambios en la estructura del rebaño (aumento de la población, competencia por alimento o formación de grupos) causa una movilización del tejido adiposo, un cambio en la alimentación y en el porcentaje de grasa. Las deficiencias nutricias, alteraciones glandulares y otras condiciones que alteren el cortisol pueden causar una movilización del tejido adiposo (Razzaghi, Ghaffari y Rico, 2023).

Alimentación: una alimentación prolongada con alto contenido de concentrado y de ácidos grasos poliinsaturados puede causar una disminución en el contenido de grasa y producción de leche (Razzaghi, Ghaffari y Rico, 2023). Una alimentación con un mayor contenido de hidratos de carbono que de lípidos pueden causar el síndrome de depresión de grasa láctea en donde puede haber hasta un 60% de reducción del porcentaje de grasa y cambios en la composición de los lípidos. La disminución de la digestión de la fibra y el pH altera el microbiota de la vaca, lo que simultáneamente disminuye la concentración de ácido propiónico y aumenta la de ácido láctico y glucosa lo que, a su vez, estimula la secreción de insulina, inhibiendo la liberación de ácidos grasos del tejido adiposo. La alimentación con forraje finamente molido puede disminuir la producción de grasa, pero aumentar la producción de leche; sin embargo, cuando el forraje es de alta calidad, puede aumentar el porcentaje de proteína de la leche. Se ha estudiado que un concentrado a base de cebada tiende a disminuir la digestibilidad de la fibra y disminuir los porcentajes de grasa, en comparación con una alimentación a base de concentrados de maíz. El consumo de ácidos grasos en la dieta puede alterar el metabolismo de los lípidos y aparecer en la leche de la misma forma en la que se ingirieron. Los efectos de los lípidos en la



producción y la composición de la leche dependen del tipo de grasa, la velocidad y forma de alimentación, el método de alimentación y el tipo del resto de la dieta. A su vez, la fracción de proteína se ve afectada principalmente por la cantidad, densidad y fuente de energía de la dieta. También un aumento en la cantidad de grasa y aceite vegetal puede disminuir la proteína de la leche (Linn, 1988).

Consumo de agua: los animales lactantes necesitan 87% más de agua debido a la alta secreción a través de la leche. Las vacas que lactan necesitan 68-151 L de agua al día, mientras que aquellas que no están en periodo de lactancia necesitan 34-49 L al día. Una disminución en el consumo de agua disminuye la secreción de leche, el consumo de alimento seco y el peso (Golher *et al.*, 2020).

Las variaciones en la composición de la leche deben tener un seguimiento y un adecuado manejo puede evitar cambios drásticos asegurando su contenido nutricional (Linn, 1988).

Producción de la leche

La lactancia es regulada por hormonas, especialmente la somatotropina y prolactina, y varios factores externos e internos pueden afectar el volumen y composición de la leche (Guo *et al.*, 2020). El ciclo de lactancia consta de cuatro fases, dependiendo de las características fisiológicas: lactancia temprana, lactancia media, lactancia tardía y lactancia seca. Durante la etapa de lactancia seca se renuevan las células epiteliales mamarias (lactogénesis) para iniciar un nuevo ciclo. Se ha demostrado que en aquellas vacas que se someten a lactancia continua, la renovación de células de la lactogénesis se reduce. En la lactogénesis participan diversas hormonas, entre ellas prolactina, insulina y cortisol.

La lactogénesis es el inicio de la lactancia y se caracteriza por un aumento de la relación de ARN/ADN, el número de ribosomas, el retículo endoplásmico y el número de mitocondrias por célula (Gorewit, 1988). Es necesaria la actividad sinérgica de factores internos

El ácido linoleico y α -linolénico de los lácteos pueden reducir el riesgo de enfermedad cardiovascular y estudios han demostrado una inhibición de la génesis de tumores

como diversas hormonas, proteasas y citocinas para una correcta lactogénesis, pero de igual manera se puede ver afectada por factores ambientales, la duración del día, el estado nutricional y estrés. La exposición a la luz influye en la regulación de la lactogénesis porque afecta el número y la actividad de las células epiteliales. Una exposición menor durante el periodo seco da como resultado una mayor producción de leche y mejora la función inmunológica. En cuanto a los factores ambientales, la exposición al calor afecta la morfología de las células mamarias, la apoptosis, la autofagia, la proliferación y disminuye la síntesis de proteínas (Guo *et al.*, 2020).

En general el aumento de peso corporal, la edad avanzada, un aporte mayor de energía, partos en otoño e invierno, temperaturas ambientales frescas y buena condición corporal, tienden a aumentar la producción de leche. Por otro lado, partos en primavera y verano, altas temperaturas, humedad, enfermedades y una menor alimentación causan una disminución en la producción de leche (Gorewit, 1988).

Composición química de la leche

Fracción lipídica

La fracción lipídica de la leche, aproximadamente 33 g/L, está compuesta principalmente por triglicéridos (95%) y el resto por diacilgliceroles (2%), colesterol (<0.5%), fosfolípidos (1%) y ácidos grasos libres (<0.5%). Se presenta como un glóbulo resistente a las enzimas pancreáticas, por lo que la digestión gástrica permite su emulsificación para la posterior digestión y absorción de la grasa.

Un aumento de ácidos grasos libres puede conferir diferentes sabores y olores en la leche y productos lácteos (Haug, Høstmark y Harstad, 2007). La mitad de los ácidos

grasos son saturados, a los cuales se les adjudica la influencia negativa del consumo de leche para la salud cardiovascular por un aumento de los lípidos en la sangre, el colesterol y las lipoproteínas de baja densidad. Se han estudiado los efectos de los ácidos grasos en la salud, entre ellos el ácido butírico, que es modulador genético y puede ayudar a prevenir el cáncer, mientras que los ácidos caprílico y cáprico tienen actividades antivirales y el láurico tiene funciones antivirales y antibacterianas. Los ácidos grasos palmítico, mirístico y láurico pueden aumentar la concentración de colesterol total en sangre, pero de igual manera aumentan la fracción de colesterol HDL, lo que tiene efectos benéficos (Haug, Høstmark y Harstad, 2007).

En cuanto a los ácidos grasos insaturados, el ácido oleico constituye aproximadamente del 24-35% del total de 2.3% de los ácidos grasos insaturados, el linoleico 3L 1.6%, y el α -linolénico 0.7%. El ácido oleico puede reducir el colesterol, colesterol LDL y triglicéridos. El ácido linoléico y el α -linolénico son compuestos activos que pueden reducir el riesgo de enfermedad cardiovascular y estudios han demostrado una inhibición de la génesis de tumores (Pereira, 2014).

La leche y los productos lácteos son las principales fuentes alimentarias de ácidos grasos saturados, que se han relacionado con un aumento en el riesgo de enfermedad cardiovascular, enfermedad coronaria e infarto. Por tanto, las recomendaciones actuales de las autoridades en salud indican el consumo de leche y lácteos con bajo contenido de grasa o descremados (Fontecha *et al.*, 2019). Actualmente, estas recomendaciones han sido cuestionadas seriamente por metaanálisis de estudios de cohorte prospectivos y ensayos clínicos controlados que han informado resultados inconsistentes. En el realizado por Fontecha y colaboradores, el cual incluyó

**La leche es un componente
básico en la dieta de 6 mil
millones de personas y su
consumo varía de 10 a 212
litros por persona al año**





doce metaanálisis de estos estudios, no se mostró que el consumo de lácteos enteros (sin descremar) afecten adversamente el riesgo de enfermedad cardiovascular.

Los fosfolípidos conforman 1% de la fracción lipídica y en su mayoría son glicerofosfolípidos y esfingolípidos; éstos están constituidos por una cola hidrofóbica y una cabeza hidrofílica que promueven la emulsificación de la grasa en el agua, dispuesta como bicapa y alternada con proteínas, conformando la membrana del glóbulo de grasa de la leche (MGGL). Esta membrana envuelve las gotas lipídicas (ricas en triglicéridos), las cuales son transportadas del retículo endoplásmico a la membrana apical de las células epiteliales mamarias (Contarini y Povo, 2013). Su función es proteger a los glóbulos de grasa de la digestión para mantener la estabilidad y uniformidad de la leche.

Recientemente se han descrito efectos positivos de la MGGL en la salud, ya que participa en la inmunorregulación, es antiinflamatoria, promueve la absorción de calcio y mejora el desarrollo intelectual. En cuanto a las propiedades, en la industria alimentaria se utiliza como emulsificante y estabilizadora de emulsiones, espumas o suspensiones. Actualmente su principal uso es como ingrediente y emulsificante en las fórmulas infantiles, promoviendo la digestión y absorción de los lípidos. La suplementación en fórmulas infantiles también ha mostrado efectos positivos en el desarrollo neurológico, la salud intestinal y el funcionamiento del sistema inmune (Nie *et al.*, 2024).

La separación de la MGGL consta de cuatro pasos: la separación de glóbulos de grasa, el lavado de la crema, la liberación de la MGGL de los glóbulos y la recolección. Al iniciar el proceso se calienta la leche cruda a 55°C y causa la formación de una crema que se pasteuriza y posteriormente se temple para batirla. El lavado de la crema se realiza por medio de una suspensión en agua o un ultrafiltrado de leche y posteriormente el suero de leche se filtra para recolectar los gránulos de mantequilla. Al finalizar estos gránulos se funden, se centrifugan y se recupera el suero que contiene la MGGL (Nie *et al.*, 2024).

Proteínas

La leche de vaca contiene aproximadamente 32 g de proteínas de alto valor biológico por litro y se encuentran en forma de micelas. Las proteínas solubles, llamadas proteínas del suero, constituyen 20%, y las proteínas insolubles, principalmente la caseína, representa 80% (Haug, Høstmark y Harstad, 2007). Las proteínas de la

MGGL representan 1% del total de proteínas. La leche contiene también nucleótidos, que incrementan la respuesta inmunológica celular y humoral, mejoran el perfil lipídico y favorecen la maduración del epitelio intestinal (Millán Jiménez, 2005).

El suero es el líquido remanente después de que la leche se cuaja al precipitarse la caseína para formar queso (Haug, Høstmark y Harstad, 2007). Las proteínas del suero son proteínas globulares, principalmente β -lactoglobulina, α -lactoalbúmina, albúmina e inmunoglobulinas, y en menor medida lactoferrina, β -microglobulina, factor de crecimiento similar a la insulina (IGF) y γ -globulina. En cuanto al contenido de aminoácidos, principalmente en el suero, se encuentran los aminoácidos de cadena ramificada (leucina, isoleucina y valina) y la lisina, mientras que la caseína tiene una proporción mayor de histidina, metionina y fenilalanina, por lo que las proteínas del suero tienen el valor biológico más alto de todas las proteínas de leche (Pereira, 2014).

Las caseínas de la leche se denominan α , β y κ -caseínas y su función principal es transportar calcio y fósforo en coágulos para facilitar su digestión (Pereira, 2014). En este sentido, la producción de queso depende principalmente del contenido de caseína en la leche. Para separar las micelas se utiliza la precipitación ácida de pH 4.6, en donde se disminuye el pH de la leche al punto isoeléctrico de las caseínas (de 4.4-5.8). La fracción restante se recupera y purifica utilizando la cromatografía, obteniendo el suero de leche (Padilla y Zambrano, 2021). La β -caseína es la causante de la alergia a la leche, especialmente en infantes.

En cuanto a la calidad y evaluación de la proteína de leche, existe una puntuación corregida por digestibilidad de las proteínas (PDCAAS) que evalúa la calidad de proteína tomando en cuenta los requerimientos del hombre y la capacidad de digestión de los aminoácidos. De acuerdo con el Instituto de Medicina de la Academia Nacional de Ciencias de EUA, la leche y el huevo cuentan con la calificación más alta (PDCAAS entre 0.95 y 1), convirtiéndolos en alimentos con una excelente fuente de proteína (Milke-García, 2011).

Hidratos de carbono

La lactosa es el componente principal de la leche después del agua (46 g/l). También pueden encontrarse monosacáridos y oligosacáridos, pero en una cantidad mínima. La lactosa es un disacárido compuesto de

Al ser una buena fuente de energía, proteína, lípidos, fósforo, magnesio, vitamina D y calcio, la leche ha sido utilizada en niños y niñas para asegurar un correcto crecimiento y desarrollo

d-glucosa y d-galactosa unidos por un enlace glucosídico. Tiene dos formas isoméricas, la α y β -lactosa, que se presentan como cristales polimórficos. En cuanto a sus propiedades, tiene un sabor menos dulce que la fructosa, sacarosa o glucosa (Johnson y Conforti, 2003).

La lactosa se obtiene por medio de un proceso de cinco pasos: concentración, coagulación y eliminación del suero, concentración, cristalización y recuperación de cristales (generalmente por centrifugación). Sus usos más comunes son en la industria alimentaria para formular alimentos para bebé, repostería, chocolate y subproductos, azúcar, sopas y salsas. Su principal función es regular el balance osmótico (Johnson y Conforti, 2003).

La intolerancia a la lactosa es el desarrollo de síntomas gastrointestinales después de su consumo por una reducción primaria o secundaria de la lactasa intestinal que digiere el disacárido. En general los animales y humanos al pasar la infancia tienen una menor producción de lactasa; no obstante, aproximadamente 25% de la población humana continúa produciendo lactasa, principalmente en el norte de Europa, África central y Medio Oriente. Las personas con intolerancia a la lactosa generalmente pueden llegar a tolerar hasta 12 g de lactosa (una taza) y excediendo esta cantidad desarrollan síntomas; de esos 12 g, pueden alcanzar a digerir hasta 2 g de lactosa, que se absorben completamente (Johnson y Conforti, 2003).

Minerales

La leche contiene 1.2% de minerales, principalmente calcio y fósforo. La concentración de calcio en leche es de 1200 mg/L y está distribuido en las micelas (800 mg/L) o en la fase acuosa (400 mg/L) (Haug, Høstmark y Harstad,

2007). En la fase acuosa, el calcio está libre (Ca^{+2}) y forma sales con el fósforo inorgánico y citrato, mientras que en fase micelar se asocia al fósforo orgánico (remanente de las moléculas de caseína), formando gránulos llamados *nanoclusters*.

Estas fases están en un equilibrio termodinámico, pero si existen cambios en el pH o en la temperatura, las moléculas de calcio pueden pasar de una fase a otra. Cuando ocurre una acidificación biológica en donde se fermenta la lactosa y se produce ácido láctico, como en el proceso del yogur, que disminuye el pH de la leche y llega al punto isoeléctrico de la caseína, precipitándose como la parte sólida del yogur y el calcio es transferido a la fase acuosa. En cambio, cuando la leche coagula por efectos de la renina –conocido como *cuaajo*– en la elaboración de quesos, el calcio migra hacia el coágulo de leche y mientras más suero tenga el queso, menos calcio contendrá. De esta forma, la concentración de calcio va disminuyendo desde los quesos duros y semiduros, hasta los suaves, leche o queso fresco (Gaucheron, 2011).

La leche contiene aproximadamente 950 mg fósforo/L y se encuentra en dos formas: orgánico e inorgánico (Haug, Høstmark y Harstad, 2007). El fósforo orgánico se asocia a las moléculas de caseínas, que se encuentran en la fase micelar, mientras que el fósforo inorgánico se encuentra en ambas fases y contribuye al equilibrio mineral en la leche. Al igual que el calcio, el fósforo inorgánico puede ser transferido a la fase acuosa durante la acidificación y se puede perder si el suero de leche es removido, especialmente cuando se hace queso (Gaucheron, 2011).

El selenio (30 $\mu\text{g/L}$) se asocia a las moléculas de caseína y al suero de leche. Dependiendo del país, la leche puede

cubrir entre 8 y 39% de la ingestión diaria recomendada de selenio. El magnesio no es tan abundante en la leche (aproximadamente 100 mg/L) y se distribuye de igual manera en la fase acuosa y micelar. Otros minerales como el sodio, potasio y cloro se concentran en la fase acuosa (Gaucheron, 2011).

Vitaminas

Las vitaminas liposolubles se localizan principalmente en los triglicéridos, por lo que se pueden encontrar en la mayoría de los productos lácteos: leche, crema, queso, mantequilla, yogur, entre otros, mientras que las vitaminas hidrosolubles se encuentran principalmente en la leche (Gaucheron, 2011).

El contenido de la vitamina A (de 10-100 µg/100 ml leche), depende de diversos factores: la alimentación del animal, la estación, la duración de almacenaje del producto y el contenido de grasa. La molécula de esta vitamina también reacciona al oxígeno, la luz o compuestos oxidantes, por lo que las concentraciones pueden verse reducidas por tratamientos térmicos o acidificación. La vitamina D tiene una concentración de 27-47 IU/L y se puede ver afectada por la luz, oxígeno, calor y acidez; por tanto, la leche generalmente se adiciona de vitamina D para evitar deficiencias y al mismo tiempo asegurar una buena utilización del calcio (Gaucheron, 2011).

La concentración de vitamina E es de 0.6 mg/L y es sensible a la oxidación por lo que se puede ver afectada por diversos factores. En los meses de verano su contenido es de tres a cuatro veces más que durante el resto del año, principalmente por el consumo de pastos frescos (Haug, Høstmark y Harstad, 2007). En cuanto a la vitamina K, la cantidad en la leche y los productos lácteos es mínima. Finalmente, sobre las vitaminas hidrosolubles, la riboflavina, el folato y la vitamina B12 son las más relevantes. A este respecto, la leche contiene 1.83 mg riboflavina/L, 50 µg folato/L y 4.4 µg vitamina B12/l (Gaucheron, 2011).

Importancia de la leche en el crecimiento y desarrollo

La relación de la leche con el crecimiento lineal y la mineralización del hueso han sido estudiadas en los últimos años. Además de la etapa fetal, en la infancia ocurre el mayor y más rápido crecimiento y desarrollo. Tanto la altura como la densidad mineral ósea son marcadores de crecimiento importantes. Los factores

genéticos determinan entre 70 y 80% del crecimiento lineal y la adquisición de masa ósea, mientras que los factores ambientales (actividad física, sedentarismo y dieta) determinan el otro 20-30% (De Lamas *et al.*, 2019).

Al ser una buena fuente de energía, proteína, lípidos, fósforo, magnesio, vitamina D y calcio, la leche ha sido utilizada en niños y niñas para asegurar un correcto crecimiento y desarrollo. El consumo de productos lácteos aumenta la secreción del factor de crecimiento similar a la insulina tipo I que regula el metabolismo y la proliferación de las células, promoviendo el crecimiento. Estudios demuestran que con un consumo de 245 ml al día puede haber un aumento de 0.4 cm al año de estatura (De Lamas *et al.*, 2019).

Los minerales en la leche desempeñan un papel esencial en la nutrición y el desarrollo de los adultos, pero especialmente en la infancia. La ingestión adecuada de calcio promueve el desarrollo, la fuerza, la densidad de los huesos en los niños y previene la pérdida ósea y las fracturas en adultos mayores. Los productos lácteos son una fuente óptima de calcio en todas las edades previniendo así enfermedades como la enfermedad periodontal y osteoporosis (Gaucheron, 2011).

Conclusiones

La leche es únicamente el líquido secretado por las glándulas mamarias de los mamíferos que conforma la dieta de millones de personas. Diversos factores influyen en la producción de leche, relacionados con el ambiente, la alimentación del animal, el estrés, entre otros, por lo que se debe tener un control y asegurarse de la calidad del alimento. Por su composición, es una excelente fuente de lípidos, proteínas, vitaminas y minerales como el calcio, fósforo y vitamina D, ayudando al crecimiento lineal en niñas, niños y adolescentes, previniendo enfermedades como la osteoporosis. Es un alimento que debería ser empleado en todas las etapas de la vida para mejorar la calidad de vida y obtener un adecuado aporte de calcio.

Referencias

- Pereira PC. Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*. 2014;30(6):619-27. doi: 10.1016/j.nut.2013.10.011.
- Visioli F, Strata A. Milk, dairy products, and their functional effects in humans: a narrative review of recent evidence. *Adv Nutr*. 2014;5(2):131-43.
- Rozenberg S, Body JJ, Bruyère O, Bergmann P, Brandi ML, Cooper C, Devogelaer JP, Gielen E, Goemaere S, Kaufman JM, Rizzoli R, Reginster JY. Effects of Dairy Products Consumption on Health: Benefits and Beliefs--A Commentary from the Belgian Bone Club and the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases. *Calcif Tissue Int*. 2016 Jan;98(1):1-17. doi: 10.1007/s00223-015-0062-x.
- Haug A, Høstmark AT, Harstad OM. Bovine milk in human nutrition--a review. *Lipids Health Dis*. 2007;6:25
- Fuentes Uribe C, Morales G, Valenzuela R. Dietary intake and prevention of overweight or obesity: a review of current evidence. *Rev Chil Nutr* 2021; 48; 942-954.
- Soedamah-Muthu SS, Verberne LDM, Ding EL, Englerink MF, Geleijnse JM. Dairy consumption and incidence of hypertension. Dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Hypertension* 2012; 60: 1131-1137.
- Audic JL, Chaufer B, Daufin G. Non-food applications of milk components and dairy co-products: A review. *Lait*. 2003; 83(6):417-438. <https://doi.org/10.1051/lait:2003027>
- Razzaghi A, Ghaffari MH, Rico DE. The impact of environmental and nutritional stresses on milk fat synthesis in dairy cows. *Domest Anim Endocrinol*. 2023;83:106784. doi: 10.1016/j.domaniend.2022.106784.
- Linn J.G., National Research Council (US) Committee on Technological Options to Improve the Nutritional Attributes of Animal Products. *Designing Foods: Animal Product Options in the Marketplace*. 1988.
- Potawska E., Bagnicka A.W., Niemczuk K., Lipinska J.O. Relations between the oxidative status, mastitis, milk quality and disorders of reproductive functions in dairy cows--A review. *Anim. Sci. Pap. Rep.* 2012;30:297-307.
- Golher DM, Patel BHM, Bhoite SH, Syed MI, Panchbhaj GJ, Thirumurugan P. Factors influencing water intake in dairy cows: a review. *International Journal of Biometeorology*; 2020.
- Guo H, Li J, Wang Y, Cao X, Lv X, Yang Z, Chen Z. Progress in Research on Key Factors Regulating Lactation Initiation in the Mammary Glands of Dairy Cows. *Genes (Basel)*. 2023;14(6):1163. doi: 10.3390/genes14061163.
- Gorewit R, Lactation Biology and Methods of Increasing Efficiency. *Animal Product Options in the Marketplace*.; 1988 Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218174/>
- Fontecha J, Calvo MV, Juarez M, Gil A, Martínez-Vizcaino V. Milk and Dairy Product Consumption and Cardiovascular Diseases: An Overview of Systematic Reviews and Meta-Analyses. *Adv Nutr*. 2019 May 1;10(suppl_2):S164-S189. doi: 10.1093/advances/nmy099.
- Contarini G, Povo M. Phospholipids in milk fat: composition, biological and technological significance, and analytical strategies. *Int J Mol Sci*. 2013;14(2):2808-31. doi: 10.3390/ijms14022808.
- Nie C, Zhao Y, Wang X, Li Y, Fang B, Wang R, Wang X, Liao H, Li G, Wang P, Liu R. Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*. 2024;16(5):587. doi: 10.3390/nu16050587.
- Millán Jiménez A. Papel de los nucleótidos en la alimentación del lactante. *An Pediatr. Monografías* 2005; 3(1): 34-42
- Padilla J, Zambrano JC. Estructura, propiedades y genética de las caseínas de la leche: una revisión. *Ces Med Vet Zootec*. 2021;16(3). <https://doi.org/10.21615/cesmvz.5231>
- Milke-García P. La importancia de la leche y los productos lácteos en la dieta. *El libro blanco de la leche y los productos lácteos*. CANILEC. 2011;1.
- Johnson MJ, Conforti FD. Lactose. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. 2003;2; 3472-3476. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00674-X>
- Gaucheron F. Milk and dairy products: a unique micronutrient combination. *J Am Coll Nutr*. 2011;30(5 Suppl 1):400S-9S. doi: 10.1080/07315724.2011.10719983.
- de Lamas C, de Castro MJ, Gil-Campos M, Gil Á, Couce ML, Leis R. Effects of Dairy Product Consumption on Height and Bone Mineral Content in Children: A Systematic Review of Controlled Trials. *Adv Nutr*. 2019;10(suppl_2):S88-S96. doi: 10.1093/advances/nmy096.

3

ESTRUCTURA PRODUCTIVA Y SOCIOECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE DE VACUNOS EN MÉXICO

Everardo González Padilla¹

José Luis Dávalos Flores¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



La diversidad de condiciones agroecológicas económicas, sociales y culturales del país expresan un rico mosaico de formas de producir leche; sin embargo, de forma arbitraria se pueden agrupar dos grandes modelos: a) lechería especializada y b) lechería de doble propósito

La producción de leche llegó al continente americano con el segundo viaje de Colón en 1493, cuando embarcó ovejas, cabras y vacas para ordeño, arribando a lo que hoy es República Dominicana, Haití, Jamaica y Cuba. Posteriormente, Hernán Cortés llevó este ganado al territorio que hoy ocupa nuestro país, y en 1532 se formalizó la venta de leche en la plaza de la Ciudad de México a petición de un grupo de españoles que solicitó permiso para ello, pagándose un real de oro por un “azumbre” (que equivalía aproximadamente a dos litros), que sólo los españoles ricos podían pagar en un principio (CANILEC, 2024a). Paulatinamente, los lácteos se fueron incorporando al consumo de las poblaciones mestizas y en menor grado al de las indígenas.

Con la evolución del país, su urbanización fue creciendo y la demanda y procesos de producción se fueron modificando; inicialmente artesanales para el autoconsumo y la elaboración local de productos lácteos consumidos y procesados en las haciendas y congregaciones religiosas, hacia sistemas compatibles con la atención de mercados de leche fluida cruda (bronca) y lácteos, fuera de los sitios de producción. Luego del desarrollo de la pasteurización y la refrigeración, y con la introducción de razas especializadas para la producción de leche a México durante el Porfiriato, a fines del siglo XIX, y luego de la Revolución, en las primeras décadas del siglo siguiente, se inicia un rápido proceso de evolución y

segmentación de la producción láctea, donde coexisten tanto los sistemas tradicionales artesanales de traspatio y la ganadería de doble propósito para el autoconsumo, como el establecimiento de empresas modernas de lechería con los adelantos tecnológicos y la integración de empresas cooperativas.

Esa diversidad subsiste en la actualidad con regiones de lechería familiar especializada a pequeña escala y producción de doble propósito, hasta cuencas tecnificadas con empresas altamente productivas, cada vez más grandes e integradas desde el campo hasta la distribución de leche y lácteos a medio mayoristas y para venta al menudeo. Este último sector es el que más ha crecido y emplea tecnologías sofisticadas, desde riego tecnificado hasta uso de genómica, robótica, procesamiento especializado y aditivos en alimentos, semen sexado, dispositivos electrónicos individuales para monitorear la salud y productividad de los animales, mejora en los procedimientos técnico-productivos, de bienestar animal y administrativos actuales.

La diversidad de condiciones agroecológicas¹, económicas, sociales y culturales del país expresan un rico mosaico de formas de producir leche; sin embargo, de forma arbitraria se pueden agrupar dos grandes modelos: lechería especializada y lechería de doble propósito. La estructura de la lechería especializada abarca desde

¹ En México hay 78 tipos de vegetación en áreas de apacentamiento y 1,479 sitios de vegetación con determinación de coeficientes de agostaderos según su condición, según la Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA).

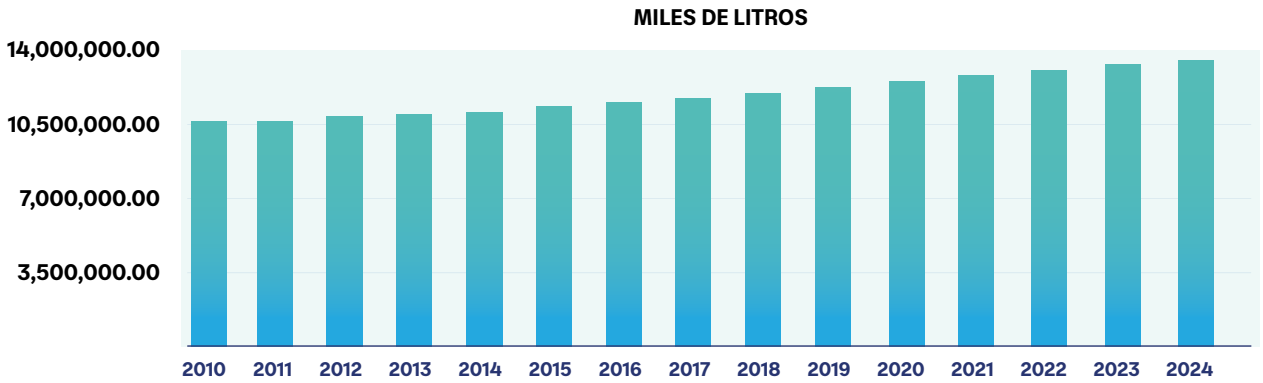
hatos muy pequeños de producción familiar y producciones modestas de 3,000 a 6,000 litros vaca/año, hasta grandes hatos, con aplicación de tecnología de punta y acceso a recursos financieros, tecnológicos y de infraestructura, que les permiten mantener niveles de producción promedio superiores a 35 L diarios por vaca en línea, de manera sostenida en miles de cabezas bovinas y en los registros oficiales de producción de la Asociación Holstein de México (México Holstein, 2025), con los hatos más productivos del país que mantienen promedios de más de 12,000 litros por lactancia.

Así entonces, la lechería especializada puede subdividirse en: a) sistemas familiares de pequeña escala, donde la mayor parte del trabajo lo realiza el propietario y su familia; b) sistemas empresariales medianos, donde la mayor parte del trabajo con los animales lo realizan empleados con la participación del propietario, que pueden o no ser parte de una cooperativa, y c) sistemas empresariales de gran escala, donde prácticamente todo el trabajo es asalariado y el propietario administra y supervisa; generalmente son hatos de cientos o miles de vacas y la empresa es socia o proveedora de consorcios integrados que proveen insumos, controlan la calidad de la leche y la procesan y distribuyen.

Por otro lado, la lechería de doble propósito se basa en vacas mantenidas en pastoreo, con o sin alimentación adicional, que amamantan a su cría y son parcialmente ordeñadas. Este sistema tiene infinidad de modalidades y prevalece en zonas tropicales del país; generalmente es estacional y únicamente algunas de las vacas del hato se ordeñan durante periodos variables, comúnmente menores a seis meses.

La producción de leche en México ha mantenido un crecimiento sostenido por encima del crecimiento de la población humana desde 1960 y experimentó un estancamiento en la década de 1980, como el resto de la economía del país. En los tres últimos años la producción nacional ha rebasado los 13 mil millones de litros anuales, cerrando 2024 con 13,553,069,380 L. Jalisco fue el principal productor de leche nacional (21%), seguido por Coahuila (12%), Durango (11%), Chihuahua (9%) y Guanajuato (7%); sin embargo, si se considera a la región de La Laguna en su conjunto, esta produce el 22% de la leche nacional (SIAP, 2025). La producción de leche creció un 27% entre 2010 y 2024, a una tasa de crecimiento media anual promedio de 1.7% (gráfica 1).

Gráfica 1: Producción de leche en México, 2010-2024



Fuente: SIAP, 2025

En términos generales, la producción de leche en México ha crecido mediante la intensificación de los sistemas, particularmente en empresas grandes y medianas con muy poco crecimiento de inventarios de vacas en la lechería especializada. Entre los ajustes más notorios se destaca el aumento de la inclusión de alimentos concentrados balanceados en las raciones. Entre 1980 y 2023, la fabricación y venta de alimentos balanceados para bovinos lecheros aumentó 6.3 veces (anuarios CONAFAB

de 1980 a 2024) y la de leche se duplicó, prácticamente con la misma cantidad de vacas en sistemas especializados (SARH, 1982; SARH, 1977; SIAP, 2024). Entre 1982 y 2024 la disponibilidad aparente de leche per capita pasó de 112 a 135 k/año (Instituto Nacional de la Leche, 1982; SIAP, 2024).

Con base en cálculos propios basados en FAOSTAT (FAO, 2025) los autores estiman que las importaciones representaron, en 2023, 29% del Consumo Nacional

La leche, además de su valor como alimento, es el tercer producto pecuario en valor económico (17.3% del PIB pecuario), sólo después de la carne de res y la carne de pollo

Aparente, con 5,388,300,547 litros equivalentes de leche, donde los principales productos importados fueron la leche descremada en polvo (LDP) sucedida por los quesos, y en tercer lugar la leche entera en polvo (LEP). A su vez las exportaciones equivalieron a 336,868,885.3 litros, destacando las fórmulas lácteas en polvo y el yogur.

Las importaciones provienen principalmente de Estados Unidos, y de hecho México es el principal país receptor de las exportaciones agropecuarias estadounidenses con \$30,320 millones de dólares americanos (USD) anuales para 2024, de los cuales \$2,470 USD millones correspondieron a 757,081 toneladas métricas de lácteos, habiendo crecido un 96% el valor de las exportaciones lácteas hacia nuestro país entre 2015 y 2024 (USDA, 2025). México consume 47% de las leches en polvo exportadas por los Estados Unidos y 35% de sus quesos (Millar, 2024).

La leche, además de su valor como alimento, es el tercer producto pecuario en valor económico (17.3% del PIB pecuario), sólo después de la carne de res y la carne de pollo (SIAP, 2025), con un valor de \$102,048,089 miles de pesos al cierre de 2022; dicho valor creció 80.8% en diez años (CANILEC, 2024b). A su vez, dentro del sector alimentario, al cierre de 2024, la elaboración de productos lácteos representó 6.7% del valor de la industria alimentaria (INEGI, 2025).

La información oficial de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) ubica el inventario actual de bovinos lecheros especializados en 2.6 millones (SIAP, 2025), que incluyen todas las edades del hato. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) reporta en el censo nacional agropecuario de 2022 la existencia de 24,553,565 bovinos, de los cuales 2,226,462 corresponden a vacas de ordeño, y el 17% de dicho hato se ubica en Jalisco, el 14% en Veracruz, el 9% en Durango, el

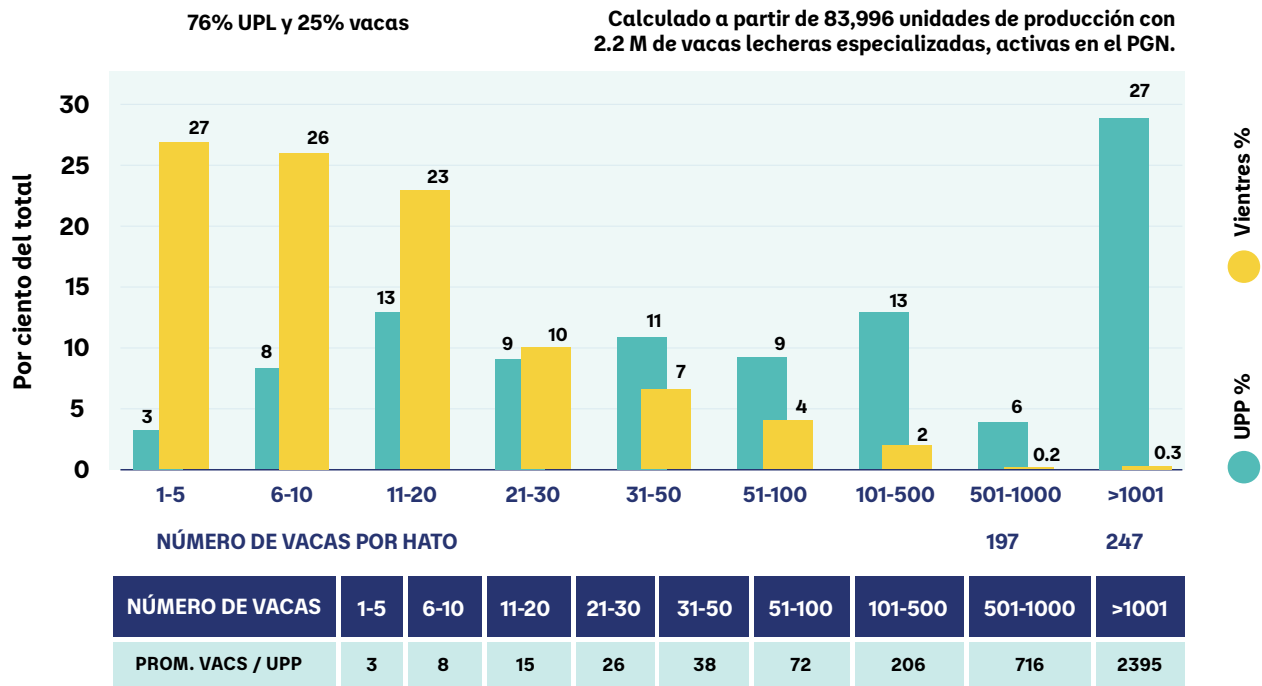
7% en Chiapas, el 6% en Coahuila y el 5% en Chihuahua (INEGI, 2023).

Sin embargo, la información disponible carece de detalles que sí son considerados en otro instrumento desarrollado conjuntamente entre el sector oficial y la Confederación Nacional de Organizaciones Ganaderas (CNOG), que es el Padrón Ganadero Nacional (PGN); éste es de afiliación voluntaria, pero exigible para la adquisición de dispositivos oficiales de identificación requeridos para la movilización legal de animales fuera del hato de origen. Mediante convenios de colaboración de la UNAM con la SADER y la CNOG, se ha tenido acceso a los datos de las distintas bases y se han ordenado para ser consultados, de manera interactiva, mediante cualquier dispositivo con acceso a internet, específicamente en la página del PGN.

En este Padrón Ganadero Nacional se puede obtener información agrupada por sistema, a nivel municipal, por región agroecológica, estatal y nacional, con detalle de características de los productores, estructura del hato y del uso de la tierra. Para la información que se incluye en este capítulo, se utilizaron las bases al cierre de enero a marzo de 2022, que contenían datos más completos del sector de ganadería lechera, con registros de 83,996 unidades de producción lechera especializada (UPL), con un inventario de 2.2 millones de vacas. A partir del análisis de esos datos y lo referente a ganadería de doble propósito, en la misma base, se deriva la información que se presenta a continuación:

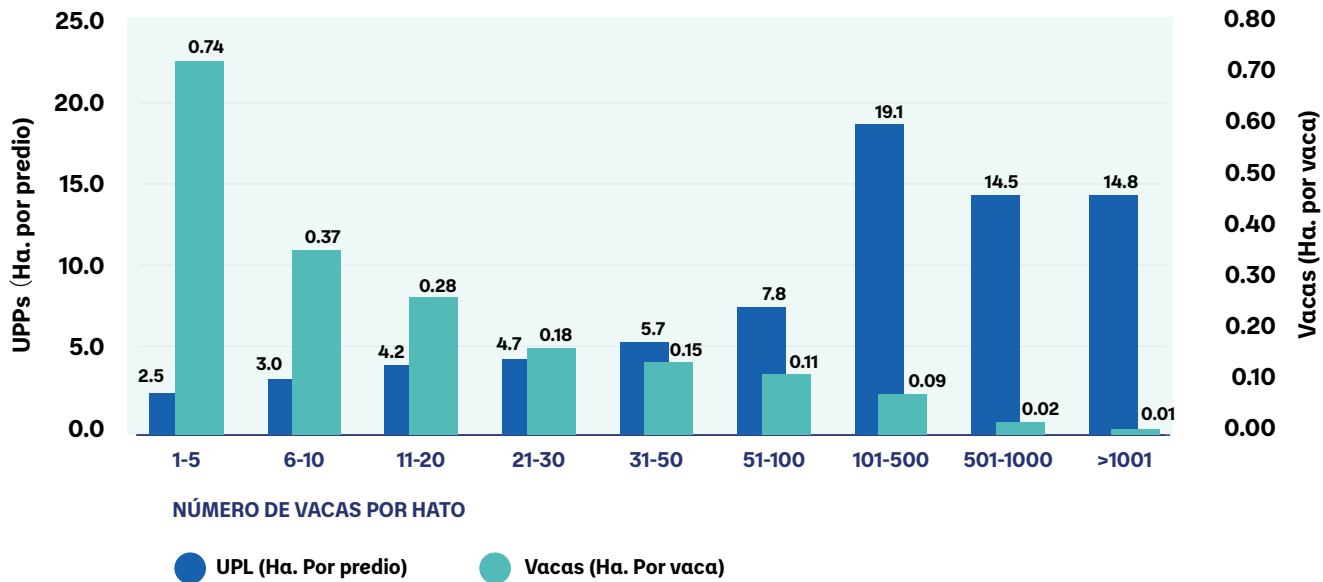
De las casi 84 mil UPL analizadas, 27% tienen de 1 a 5 vacas, que representan el 3% del inventario; 76% de las UPL cuentan con menos de 21 vacas y representan en números redondeados 25% de las vacas. En el otro extremo, menos de 450 UPL (menos de 1%) tienen más de 500 vacas y poseen 33% del inventario (gráfica 2).

Gráfica 2: Porcentajes de UPL y de vacas en sistemas lecheros especializados, según tamaño del hato en México (Enero-marzo, 2022)



Fuente: Cálculos propios de Everardo González Padilla y Noé Orlando Juárez López, con información del Padrón Ganadero Nacional (PGN), 2022.

Gráfica 3: Tierras con potencial agrícola de temporal por UPL y por vaca, en UPL con distintos tamaños de hato



Fuente: cálculos propios de Everardo González Padilla y Noé Orlando Juárez López con información del Padrón Ganadero Nacional (PGN), 2022.

La tendencia continúa hacia la concentración del inventario y de la producción en menos UPL, cada vez más grandes y tecnificadas. La mayor concentración de UPL de 30 o menos vacas se encuentra en una amplia faja que va de occidente al oriente del país en su porción central (de Jalisco al centro de Veracruz, destacándose el noreste de Jalisco), en tanto que los hatos con 500 o más vacas se concentran en la región templada y de trópico seco en el centro-occidente y centro del país y el semiárido del norte (con mayor concentración en la región de La Laguna de Coahuila y Durango, y en Chihuahua).

De las UPL analizadas, es evidente la diferencia de acceso a recursos agrícolas de los distintos estratos de productores; como tendencia general, la disponibilidad de tierra agrícola de temporal por vaca disminuye conforme se aumenta el tamaño de los hatos (gráfica 3), con 0.74 ha/vaca en hatos de 1 a 5 vacas a 0.01 ha/vaca en las más grandes.

Lo contrario ocurre con el acceso a tierras de riego (cuadro 1), donde el acceso a este recurso es de 0.08 ha/vaca en los hatos más pequeños, a 0.26 ha/vaca en los más grandes. De cualquier forma, la mayoría de los productores dependen en buena medida de forrajes producidos fuera de la UPL y del uso de alimentos balanceados, elaborados principalmente con materia prima de importación por las mismas empresas, sus cooperativas, organizaciones gremiales de productores o en fábricas comerciales de alimentos balanceados; la alimentación generalmente representa más de 65 % de los costos de producción en la lechería especializada..

Un aspecto importante de la estructura de la producción en el campo en México es el tipo de tenencia de la tierra de los productores, toda vez que, al amparo de las leyes agrarias derivadas de la Revolución iniciada en 1910, se

repartieron entre campesinos alrededor de 100 millones de ha entre 1911 y 1992, conformándose cerca de 30,000 ejidos y comunidades (Warman, 2022 y Salazar Adame, 2004) que constituyen la denominada propiedad social que coexiste con la pequeña propiedad privada en el campo. De los datos analizados, se desprende que 58% de los propietarios son del sector privado y tienen 77 % de las vacas, mientras en el sector social, estas cifras son 42% y 23%, respectivamente (cuadro 2), y se destaca que la mayor parte de las vacas en el sector social se encuentran en hatos de menos de 50 vacas, en tanto que en los hatos de más de 500 vacas, en las propiedades del sector privado hay 14 veces más vacas que en las del sector social.

Otra diferencia vinculada al tipo de tenencia de la tierra y al tamaño de los hatos es el número y proporción de vaquillas de reemplazo en el hato; este aumenta conforme aumenta el tamaño del hato y tiende a ser mayor en las UPL de propiedad privada (Cuadro 3), lo que refleja la posibilidad de mayor presión de selección en los hatos, la necesidad de reemplazo más acelerado de las vacas por la intensidad de explotación y la aplicación de mejores técnicas de cría de becerras y uso estratégico de semen sexado que no son todavía de acceso generalizado a todos los productores.

A partir de la experiencia de los autores y con la información disponible, se hace la estimación del origen de la producción de leche que se produce y comercializa formalmente en el país. Alrededor de 93 % se genera en sistemas especializados y 7 % en sistemas de doble propósito que se describen más adelante. Cerca de 44 % de la leche viene de hatos con más de 500 vacas y el sector más numeroso de productores (>85 %), que tienen hasta 30 vacas, aportan alrededor de 18 % (cuadro 4).

La tendencia continúa hacia la concentración del inventario ganadero lechero y de la producción en menos UPL, cada vez más grandes y tecnificadas

Cuadro 1: Tierras con potencial agrícola de riego por UPP y por vaca, en UPL con distintos tamaños de hato

NÚMERO DE VACAS	POR UPL (HA)	POR VACA (HA)
1-5	0.3	0.08
6-10	0.5	0.06
11-20	0.7	0.04
21-30	0.8	0.03
31-50	1.1	0.03
51-100	1.8	0.03
101-500	7.0	0.03
501-1000	20.2	0.03
>1001	622.7	0.26

Fuente: cálculos propios de Everardo González Padilla y Noé Orlando Juárez López con información del Padrón Ganadero Nacional (PGN), 2022.

Cuadro 3: Vaquillas de más de un año/100 vacas, en hatos de distinto tamaño, por tipo de tenencia de la tierra

ESTRATOS VACAS	SOCIAL	PRIVADA	TOTAL
1-5	23	24	24
6-10	21	22	22
11-20	23	25	24
21-30	22	25	24
31-50	22	27	25
51-100	26	26	26
101-500	28	30	30
501-1000	29	34	33
>1001	18	37	37

Fuente: cálculos propios de Everardo González Padilla y Noé Orlando Juárez López con información del Padrón Ganadero Nacional (PGN), 2022.

Cuadro 2: La lechería especializada en el sector social y privado de tenencia de la tierra

NÚMERO DE VACAS	UPL %		VACAS %	
	Privado	Social	Privado	Social
1-5	26	30	2	7
6-10	25	28	6	16
11-20	23	24	10	25
21-30	10	9	7	16
31-50	8	6	9	17
51-100	5	2	10	9
101-500	2	1	14	7
501-1000	0	0 (8)	8	1
>1001	1	0 (5)	34	2
TOTAL	58	42	77	23

Fuente: cálculos propios de Everardo González Padilla y Noé Orlando Juárez López con información del Padrón Ganadero Nacional (PGN), 2022.

Cuadro 4: Porcentaje de la producción nacional de leche, estimada para los diferentes tamaños de hato y sistemas (números redondeados aproximados)

VACAS / UPP	% DE LAS VACAS	% DE LA PRODUCCIÓN
1-10	12	5
11-30	22	13
31-100	20	17
101-500	13	14
501-1000	6	8
>1001	27	36

Nota: se estima que los millones de vacas en sistemas no especializados (doble propósito) aportan alrededor de 7% de la producción nacional. (Fuente: estimaciones empíricas propias y a partir del PGN y del SIAP-SADER).

Características de la ganadería de doble propósito (DP)

La ganadería DP en México, como en otras partes de la América tropical, es básicamente una actividad complementaria a otras tareas en el campo, la cual realizan fundamentalmente pequeños y medianos productores en regiones tropicales, aunque también se realiza en algunas regiones agroecológicas. De la información revisada, se describen algunas características de la ganadería de doble propósito sobre sus prácticas tecnológicas y de comercialización: 93% ordeñan una vez al día; 91% ordeñan a mano; 73% apoyan con el becerro durante toda la ordeña; 14% dicen usar oxitocina para bajar la leche; 73% limpian las tetas antes de la ordeña; 10% usan selladores; 18% hacen pruebas de mastitis; 6% tienen medios para enfriar la leche; 50% venden la leche a queseros; 32% venden productos que elaboran; 24% venden leche bronca directamente; 6% a alguna cooperativa. De las unidades de productores de DP, que declaran que de la leche obtienen su ingreso principal: 40% están en municipios de trópico seco y 54% en municipios de trópico húmedo. De las tierras en uso en esas unidades de producción de trópico seco y trópico húmedo, 80% y 96%, respectivamente, basan su producción en praderas naturales o introducidas; 97% son de temporal.

En cuanto al número de productores, 521 mil indicaron dedicarse a esta actividad; en sus predios hay más de 9 millones de vacas y 15.7 millones de ha, pero con el conocimiento de que en muchos de esos hatos sólo se ordeñan unas cuantas de las vacas y por periodos muy cortos y variables, se analizaron los datos para depurar únicamente a los hatos que declararon ser de DP y, además, que la venta de leche fue su principal fuente de ingresos. Los resultados obtenidos dejaron 97,200 productores, con 1.78 millones de vacas y 2 millones de ha con uso definido; 87% de esas unidades de producción tienen 30 o menos vacas cada una y poseen el 53% de las vacas en ese sistema. Asimismo, 94.2% de esas vacas están en las regiones tropicales, y las tierras de las UPP que son praderas, representan 80% en el trópico seco y 95% en el trópico húmedo; 97% de las praderas son de temporal. El 44% de las vacas de propiedad privada están en hatos con 1 a 30 vacas, en tanto que las de propiedad social son 58%. En el otro extremo, en hatos de 100 o más vacas se ubican 21% de las del sector social y solamente 6% de las del sector privado (González-Padilla, 2024).

Es entonces claro que la ganadería de DP es básicamente una actividad de las regiones tropicales, de productores a

pequeña escala, que depende para la alimentación de sus animales de praderas de temporal de forrajes de mediana a baja digestibilidad y bajas concentraciones de proteína, con serias limitaciones para el manejo higiénico de la leche y para su conservación en campo. La mayoría de los productores continúan aplicando tecnología tradicional, poco actualizada, y se ven forzados a comercializar su producto en condiciones de desventaja, a través de múltiples canales, muy alejados de lo prevalente en los sistemas especializados de la lechería moderna del país.

En esas condiciones, la participación marginal de los sistemas de DP en la leche que se comercializa en el país difícilmente rebasa 7%; sin embargo, tiene una gran importancia social por su aportación a los consumos locales de leche en los municipios de alta y muy alta marginalidad, por ser soporte de pequeñas agroindustrias y porque asegura para las unidades productivas pecuarias un flujo de efectivo más permanente y predecible, amén de proporcionar empleos permanentes para la familia y sus vecinos.

Características de la ganadería lechera especializada de pequeña escala familiar

Este sistema aglutina al mayor porcentaje de unidades productivas especializadas lecheras del país, donde deriva su importancia social, teniendo su mayor presencia en Jalisco, Estado de México, Michoacán, Tlaxcala, Guanajuato, Chihuahua, Hidalgo, Puebla y Guerrero.

Con base en el análisis de la información recabada a productores beneficiarios del programa oficial de fomento ganadero “PROGAN Productivo” de la Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) que en 2018 benefició a 27,346 productores lecheros familiares, se obtuvieron los siguientes resultados (Dávalos, 2018): 89% de los productores son hombres; sólo 2% señaló pertenecer a alguna etnia indígena; la edad media del productor es de 57 años, con 3.1 dependientes económicos y 88% es casado. Además, 14% no tiene estudios y 52% tiene primaria concluida o inconclusa. La superficie promedio de su unidad productiva es de 941 m², en un terreno de 3.8 ha.

En cuanto a sus instalaciones, 56% cuenta con un área exclusiva para el ordeño y 50% con un área para el manejo de la leche; 73% dispone de agua potable, y 68% cuenta con un área exclusiva para el manejo del alimento del ganado. Sólo 10% cuenta con tanque enfriador de leche. Destaca entonces la importancia de promover





La participación marginal de los sistemas de Doble Propósito en la leche que se comercializa en el país difícilmente rebasa el 7%; sin embargo, tiene una gran importancia social por su aportación a los consumos locales de leche, por ser soporte de pequeñas agroindustrias y porque le asegura empleo al productor y un flujo de efectivo continuo

La lechería especializada de pequeña escala familiar padece indicadores de productividad bajos, pero al ser el sistema que aglutina el mayor número de UPL, cobra gran relevancia social

una mayor infraestructura para el ordeño y manejo de la leche en condiciones adecuadas, así como para el manejo del alimento que se suministra al ganado, todo ello para garantizar una mayor calidad e inocuidad de la leche obtenida.

Respecto a las prácticas tecnológicas de este sector productivo en la colecta de leche, 38% realiza ordeño mecánico. Un 79% asevera realizar limpieza e higiene del equipo e implementos del ordeño; 78% señala lavar y desinfectar ubres; 80% realiza despunte, y 42% utiliza selladores. Sólo 31% realiza pruebas para diagnóstico de mastitis. Las buenas prácticas de ordeño son imprescindibles para garantizar la calidad de la leche, siendo necesario en particular incidir por ejemplo en el uso de selladores y pruebas de diagnóstico de mastitis. A su vez, la mecanización del ordeño es una condición que también se debe valorar particularmente en hatos más grandes, dadas las condiciones de cada vez menor disponibilidad de mano de obra para dicha actividad.

En cuanto a las prácticas tecnológicas de salud animal, 55% asevera llevar calendario zoonosanitario; sólo 64% indicó participar en campaña contra la brucelosis (24% vacuna, 36% hace prueba de hato y sólo 4% tiene certificado de hato libre). Igualmente, sólo el 48% participa en campaña de tuberculosis y 4% en rabia paralítica bovina. En cambio, 93% declara desparasitar al ganado (91% contra endoparasitosis y 87% contra ectoparasitosis). Por otra parte, 66% de los productores de este segmento declaran vacunar (59% contra pasteurellosis, 64% contra clostridiosis, 14% contra leptospirosis y 14% contra IBR). Si bien –en términos generales– las prácticas sanitarias son las de mayor adopción por parte de los productores pecuarios mexicanos, para el caso de enfermedades de gran importancia tanto en salud pública como en la economía de

la finca, como lo son la brucelosis y la tuberculosis, se debe trabajar con un mayor esfuerzo conjunto coordinado de autoridades, asociaciones, procesadores y este segmento de productores de pequeña escala familiar.

Respecto a las prácticas tecnológicas de alimentación, 83% de los productores lecheros familiares suministra sales minerales, aunque sólo 60% lo hacen de manera continua. Asimismo, el 67% suministra alimento balanceado comercial y 35% alimento preparado en la propia UPL, aunque no todos lo hacen de manera continua. Sólo 55% suministra forrajes conservados como ensilados o henificados, aunque sólo 61% de manera continua. Además, 78% señaló suministrar esquilmos y subproductos a su ganado, donde seguramente muchos son rastrojos. Por otro lado, sólo 57% de los productores lotifica a su ganado, práctica necesaria para un mejor manejo del ganado. De los resultados anteriores destaca la necesidad de promover mayor asistencia técnica y ejercicios coordinados de proveeduría de alimento continuo y de calidad al ganado, tanto de forrajes como de concentrados; la alimentación juega el rol más importante en la producción de leche del ganado.

En cuanto a las prácticas de manejo reproductivo y genético, sólo 22% llevan registros técnicos; 32% realiza diagnóstico de gestación. Asimismo, 72% indica desechar vientres improductivos y 49% seleccionar hembras de reemplazo (aunque sin llevar registros, estos datos resultan poco confiables). Sólo 5% señala evaluar sementales y 18% llevar un programa de mejoramiento genético. Asimismo, sólo 39% practica inseminación artificial. Luego entonces, es importante promover fuertemente en este sector productivo la práctica de registros técnicos adecuados para la toma de decisiones en el establo, así como fomentar el uso de la inseminación artificial a

efecto de acceder a toros de mejor calidad genética. Por otro lado, la asistencia técnica bien diseñada y conducida es una herramienta imprescindible para lograr mejoras en el sistema de producción lechera, pero sólo 30% de los productores analizados señaló recibirla de manera continua.

Los parámetros antes señalados de alimentación, manejo reproductivo, baja calidad genética, carencia de registros, problemas sanitarios, como pueden ser la mastitis y los abortos, entre otros, contribuyen entonces a tener indicadores de productividad bajos en este segmento productivo lechero especializado de pequeña escala familiar: 66% de tasa de nacencias, 8% de mortalidad de crías, y 13.6 litros de leche producida por vaca al día con lactancias de 225 días (Dávalos, 2018). Lo anterior, aunado a que 57% de dichos productores señalan vender su leche a acopiadores, deriva las más de las veces en incertidumbre de precios y volúmenes de compra, e incluso frecuencia en la recepción de sus pagos.

El sector lechero de pequeña escala familiar demanda atención y acciones específicas que atiendan tanto las variables endógenas a la propia finca que condicionan su desarrollo, como las exógenas (políticas, precios internacionales, etcétera) que inciden en la misma (Dávalos, 2017).

Conclusiones

La estructura de la producción de leche en México es un complejo mosaico de condiciones y sistemas que dificulta y resta sentido o significación a grandes generalizaciones a nivel nacional, como producción promedio por vaca al año, tamaño promedio de las unidades de producción y otras. Igualmente compleja es la estimación de huella de GEI o de agua por vaca o por litro de leche y las recomendaciones y acciones para racionalizar el consumo de agua y reducir las emisiones de GEI, deben ser específicas para los distintos estratos y condiciones de producción.

Referencias

- Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC). 2024a. Historia de la leche y sus derivados en México. CANILEC – Ámbar Editores. México
- Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC). 2024b. Compendio de estadísticas del sector lácteo. México
- Consejo Nacional de Fabricantes de Alimentos Balanceados y de la Nutrición Animal, A.C. (CONAFAB). 1980 a 2024. La Industria Alimentaria Animal en México.
- Dávalos-Flores, J.L. (2017). Seguridad alimentaria: el caso de los lácteos. En: Felipe Torres Torres (coord). *Implicaciones regionales de la seguridad alimentaria en la estructura del desarrollo económico de México*. (pp.345-372). México, D.F.: Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM.
- Dávalos-Flores, J.L., Pérez-Martínez, E.E., Pablos-Hach, J.L. y Dabundashvili, D. (2018). PROGAN Productivo: estudio sobre la situación productiva, económica y ecológica de las unidades de producción beneficiarias del PROGAN Productivo 2018. SAGARPA-FedMVZ. México.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2025. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>
- González-Padilla, E. 2024. *Perspectivas del sistema de bovinos de doble propósito*. En: Santos E.R., Rangel Q. J. y Valdovinos T.M.E., XXIII Simposio de ganadería tropical: Sistema bovinos de doble propósito. La Posta, INIFAP, Veracruz, México. ISBN 978-607-37-1746-5.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2023. Censo agropecuario. Resultados definitivos. Tabuladores de trabajo.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2025. Sistemas de cuentas nacionales. Producto Interno Bruto. <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=20&vr=1&in=2&tp=20&wr=1&cno=1&idrt=3257&opc=p>
- Instituto Nacional de la Leche. 1982. Informe de labores. SARH, México.
- México Holstein (Órgano oficial de Holstein de México, A.C.). 2025. 56:1, enero de 2025.
- Millar, Glenn. 2024. *Situación y perspectivas del mercado mundial de lácteos*. Consejo Asesor de Lácteos de California, USA. Congreso CANILEC 19-22 septiembre de 2024. Los Cabos, México.
- Padrón Ganadero Nacional (PGN). 2024. Página para consulta SADER-CNOG-UNAM (<http://www.fmvz.mx/departamentos/genetica/padron.html>).
- Salazar A. F. 2004. *La reforma agraria en la transición*. Secretaría de la Reforma Agraria. México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1977. *Plan Nacional Ganadero 1977 - 1982*. Subsecretaría de Ganadería. México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1982. *Informe de labores 1977 - 1982*. México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2025. *Avance mensual de la producción pecuaria*. https://nube.agricultura.gob.mx/avance_pecuario/
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2024. *Expectativas Agroalimentarias 2024*. 64pp.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2025. U.S. trade with Mexico in 2024. USDA Foreign Agricultural Service. <https://www.fas.usda.gov/regions/mexico>
- Warman A. 2022. La reforma agraria mexicana: Una visión de largo plazo. En: *El campo mexicano en el siglo XX*. México D.F. Fondo de Cultura Económica.

4

LA SOSTENIBILIDAD Y LA DESCARBONIZACIÓN EN LA INDUSTRIA PROCESADORA LÁCTEA

José Mariano Salceda Servín de la Mora¹

¹S&MS Consulting



La descarbonización se ha convertido en una prioridad no sólo para el bienestar del planeta, sino también para la sostenibilidad y el éxito a largo plazo de las empresas

Los productos lácteos proporcionan nutrientes esenciales y representan los medios de vida para muchas personas en todo el mundo (Tetrapak, s. f.). Sin embargo, la industria lechera también realiza un uso considerable de la tierra y de la energía, con una generación de emisiones de gases de efecto invernadero en el orden de 2.7% en todo el planeta (Tetrapak s. f., con base en FAO, 2010).

Al hablar sobre estos temas nos vemos obligados a reflexionar en lo que motiva a las empresas a destinar esfuerzos y recursos en la sostenibilidad y la descarbonización. Hoy en día los gobiernos, las entidades reguladoras, los inversionistas, los clientes, los compradores, los colaboradores y, cada día más, los consumidores requieren o exigen que las empresas se involucren a fondo en los esfuerzos globales y/o individuales de cada país para reducir gradualmente las emisiones de CO₂ y trabajar todos juntos para reducir los efectos del cambio climático, así como para contribuir al bienestar de las comunidades donde participan o contribuyen.

La descarbonización se ha convertido en una prioridad no sólo para el bienestar del planeta, sino también para la sostenibilidad y el éxito a largo plazo de las empresas. Podemos citar algunas motivaciones clave que impulsan a las empresas a destinar esfuerzos y recursos en este ámbito:

Inversionistas: dentro de sus expectativas, están cada vez más interesados en empresas que demuestran un compromiso con la sostenibilidad. La presión para cumplir con criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG)

está llevando a las empresas a invertir en descarbonización para atraer capital o nuevos inversionistas.

Gobierno y presión regulatoria: los gobiernos y entidades reguladoras están implementando normativas más estrictas sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las empresas que no se adapten a estas regulaciones pueden enfrentar sanciones o impuestos, lo que las motiva a adoptar prácticas más sostenibles.

Clientes y consumidores: ambos están exigiendo más que nunca productos y servicios más sostenibles. Las empresas que responden a esta demanda no solo mejoran su imagen y preferencia por una marca, sino que también pueden aumentar su base de clientes y lealtad. Los consumidores están cada vez más interesados en la sostenibilidad y prefieren comprar productos de empresas que demuestran un compromiso con el medio ambiente. Esto puede traducirse en una mayor lealtad del consumidor y en un aumento de las ventas. Según la compañía DSM (2024), las preferencias de los consumidores están cambiando; 70% de éstos quiere que los supermercados y minoristas sean más transparentes en materia de sostenibilidad y 66 % pagaría más por marcas consideradas “marcas sostenibles”.

Colaboradores: trabajar en una empresa que se dedica a la reducción del cambio climático y a la descarbonización puede ser atractivo para este sector por razones que van más allá de la compensación económica. La alineación de valores, el sentido de propósito, la cultura organizacional y las oportunidades de crecimiento son sólo algunas de

las motivaciones que pueden influir en su decisión. Las empresas comprometidas con la sostenibilidad suelen fomentar una cultura de colaboración, responsabilidad y ética.

Responsabilidad social corporativa: muchas empresas ven la descarbonización como parte de su responsabilidad social. Al contribuir a la lucha contra el cambio climático, pueden mejorar su reputación y fortalecer su relación con la comunidad.

Innovación y competitividad: la búsqueda de soluciones sostenibles puede impulsar la innovación. Las empresas que invierten en tecnologías limpias y prácticas sostenibles a menudo descubren nuevas oportunidades de negocio y se posicionan mejor en el mercado. En otras palabras, se traduce en ventaja competitiva.

Reducción de costos: la mejora de eficiencias en general y la reducción de residuos pueden llevar a una disminución de costos operativos. Las empresas que implementan prácticas sostenibles a menudo encuentran formas de operar de manera más eficiente.

Futuro del planeta: muchas empresas están motivadas por un sentido de responsabilidad hacia las futuras generaciones. Al invertir en descarbonización, están contribuyendo a un futuro más saludable y sostenible para todos.

Colaboración global: la descarbonización es un esfuerzo colectivo. Las empresas que se involucran en iniciativas globales y colaboran con otras organizaciones pueden tener un impacto más significativo y contribuir a un cambio real.

En resumen, la descarbonización no sólo es una respuesta a las exigencias externas, sino también una estrategia inteligente para las empresas que buscan prosperar en un mundo que valora cada vez más la sostenibilidad. Así, cuando hablamos de sostenibilidad y descarbonización, nos referimos a la necesidad de desarrollar prácticas y políticas que permitan satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. La sostenibilidad abarca aspectos económicos, sociales y ambientales, buscando un equilibrio entre ellos.

Por otro lado, la descarbonización se centra específicamente en reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI), que son responsables del cambio climático. Esto implica transformar nuestros sistemas de energía, transporte y producción para que sean más limpios y eficientes, utilizando fuentes renovables y tecnologías que minimicen el impacto ambiental. En resumen, ambos conceptos están interrelacionados y son fundamentales para construir un futuro más saludable y equitativo para todos.

Cuando hablamos empresarialmente de todos estos temas, nos referimos a una amplia variedad de elementos o temas, como las emisiones al medio ambiente, los GEI, el uso de energía, el agua y la huella hídrica, los desechos, los desperdicios, la biodegradabilidad de los materiales, el bienestar animal, el bienestar de la naturaleza, el impacto social en las comunidades, entre otros. Es imprescindible que las empresas tengan un programa de capacitación y entrenamiento en todos estos temas y conceptos, si es que en verdad quiere que todos sus colaboradores se embarquen y comprometan con todas las iniciativas, proyectos, planes de acción y los objetivos que fije la organización.

Los consumidores están cada vez más interesados en la sostenibilidad y prefieren comprar productos de empresas que demuestran un compromiso con el medio ambiente

Alguna vez me di a la tarea de preguntar sobre temas ambientales a diferentes personas de mi círculo empresarial y de proveedores en México. Pregunté sobre conceptos como la huella de carbono (CFP, por sus siglas en inglés), los GEI, la huella hídrica, la descarbonización, la sostenibilidad y el bienestar animal, entre otros. La verdad es que el nivel de cultura en los temas y conocimiento resultó ser bajo; sin embargo, creo que en los últimos 10 o 15 años ha habido un avance apreciable en la conciencia sobre éstos. Aun así, considero que existe una gran área de oportunidad para seguir educando y promoviendo la importancia de la sostenibilidad y descarbonización en el ámbito empresarial.

La conciencia ambiental en el ámbito empresarial lácteo mexicano es más que importante para el logro de nuestros objetivos como empresas, como sector y como país. Por ello, capacitar y entrenar a los colaboradores en temas de sostenibilidad y descarbonización es fundamental por varias razones. En primer lugar, ayuda a crear una cultura organizacional que valora el medio ambiente y la responsabilidad social. Cuando los colaboradores están bien informados sobre estos temas, pueden tomar decisiones más conscientes y alineadas con los objetivos sostenibles de la empresa.

Además, la capacitación en sostenibilidad puede mejorar la eficiencia operativa. Al entender cómo reducir el consumo de recursos y minimizar residuos, los colaboradores pueden contribuir a la reducción de costos y a la mejora de la rentabilidad de la empresa. También, en un mundo donde los consumidores valoran cada vez más las prácticas sostenibles, tener un equipo capacitado puede mejorar la imagen de la empresa y atraer a más clientes.

Por último, la formación en descarbonización prepara a la empresa para cumplir con regulaciones ambientales y estándares internacionales, lo que puede ser crucial para su competitividad en el mercado. En resumen, invertir en la capacitación de los colaboradores en estos temas no sólo beneficia al medio ambiente, sino que también impulsa el crecimiento y la sostenibilidad a largo plazo de la empresa: es un “ganar-ganar”.

En general las compañías en el mundo y en México están respondiendo con compromisos internos o públicos para reducir gradualmente sus emisiones de CO₂, consumo de

agua, consumo energético, sus principios y políticas sobre bienestar animal, así como estableciendo e implementando proyectos sociales y apoyo a comunidades.

Las empresas del sector lácteo mexicano no son una excepción y tenemos ejemplos tácitos, como el proyecto Margarita de Danone con pequeños productores de Jalisco y Aguascalientes para producir leche de calidad con programas de agricultura regenerativa y generación de energía eléctrica a través de paneles solares, que es indispensable para el enfriado de la leche inmediatamente después de la ordeña. Otro excelente ejemplo es la planta de leche en polvo de Nestlé en Lagos de Moreno, Jalisco, que inauguró en 2014 y que se convirtió en la primera planta “Cero Agua” (Huella Hídrica Cero o Neutral) en el mundo, entre otros ejemplos.

Inicialmente, todos los esfuerzos se han venido concentrando en las emisiones de alcance 1 y 2 bajo el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG, por sus siglas en inglés), que son las producidas directamente por las compañías o indirectamente a través de la compra de energía. Hoy día, sin embargo, más organizaciones se están comprometiendo a reducir sus emisiones de alcance 3, generadas en la cadena de valor ascendente y descendente (*upstream* y *downstream*), tal cual lo explica Peter Spiller (2021).¹ El mismo autor señala que la descarbonización activa de la cadena de suministro se está transformando en una “licencia para operar” para las compañías, pero quienes deseen ser líderes en la lucha contra el cambio climático deberán superar varias barreras en el camino.

Si bien lograr emisiones netas de alcance 1 y 2 iguales a “cero” es un desafío complejo que requiere una inversión significativa de recursos, abordar las emisiones de alcance 3 presenta complicaciones adicionales. Éstas incluyen prácticas que pueden ser complicadas y, en ocasiones, imprecisas en cuanto a su cálculo y seguimiento. Además, es fundamental trabajar de manera colaborativa con clientes, redes de abastecimiento, proveedores y grupos de la industria. También se enfrenta a la dificultad de mantener el compromiso de todas las partes involucradas en un esfuerzo de cambio que es intrincado y de larga duración. En este proceso es vital mapear muy bien el recorrido de la descarbonización de todos los materiales y servicios incluyendo la logística.

¹ **Alcance 1:** son emisiones directas de los procesos de la empresa que están bajo su control directo, básicamente por el consumo de combustibles. **Alcance 2:** son emisiones indirectas que resultan de la generación de energía comprada (electricidad, calor, etcétera). **Alcance 3:** son emisiones indirectas que se derivan de la cadena de valor como la de proveedores, transporte, uso de los productos que genera la empresa y el manejo de desechos de esos productos.



Existen tres pasos hacia las cero emisiones netas, según nos explica Peter Spiller:

1. Línea de base y valor en juego: el primer paso consiste en determinar el volumen real de gases de efecto invernadero (GHG) generado por la cadena de valor de una compañía. Medir las emisiones de alcance 3 a lo largo de toda la cadena de valor externa a las propias operaciones es un gran desafío. El Protocolo GHG define 15 categorías de emisiones; entre otras, bienes y servicios adquiridos, bienes de capital, distribución y transporte hacia y desde las instalaciones, y el uso (o el fin de la vida útil) de los productos vendidos. Es necesario un esfuerzo de grandes proporciones para recopilar los datos de actividad necesarios (típicamente a nivel de transacción, como registros de gasto o de envío), así como los factores de emisión asociados. Es aquí en el alcance 3 donde algoritmos y herramientas de cálculo informáticas estándar para la determinación de la huella de carbono por material o por servicio son indispensables. Luego de definir la línea de base, las empresas deben articular con claridad el valor asociado a las emisiones identificadas.

2. Definición de hoja de ruta y objetivos y diseño del programa: el segundo paso consiste en definir un objetivo de descarbonización adecuado y un camino realista para alcanzarlo. En este paso es donde quedan incluidas medidas, por ejemplo, que pueden incluir iniciativas de reducción de empaques y desperdicio, cambio a fuentes de energía renovables, optimización de la logística, etcétera.

3. Implementación y monitoreo: la implementación de las iniciativas tiene lugar dentro de cada función o área de negocios, bajo el liderazgo de un mecanismo general de dirección y seguimiento de iniciativas. Las fábricas trabajan en la reducción de emisiones fugitivas, el consumo de energía y el desperdicio. Compras se encarga del abastecimiento de energías renovables y de la comunicación de los objetivos de descarbonización a los proveedores, habitualmente en el marco de esfuerzos de colaboración y desarrollo diseñados para ayudarlos a alcanzar las metas. El departamento de investigación y desarrollo (I&D) trabaja en el diseño de productos bajos en emisiones, mientras que Ventas busca inducir a los clientes a elegir esos productos. En el monitoreo, es fundamental que las herramientas utilizadas para definir la línea base

sean coherentes con las que se emplean durante el proceso de monitoreo.

Con base en esos tres pasos o tareas, Spiller señala los desafíos para intensificar los esfuerzos de descarbonización por parte de las organizaciones, identificando cinco desafíos clave en las tres tareas para lograr cadenas de valor con cero emisiones netas: a) definir la línea de base de emisiones de alcance 3 y cuantificar el valor en juego. Desafíos de la tarea a: 1) ausencia de bases para cuantificar las emisiones, y 2) dependencia excesiva de datos secundarios sobre emisiones de alcance; b) elaborar una curva de costos de abatimiento de carbono para priorizar hoja de ruta y objetivos. Desafíos de la tarea b: 3) gran incertidumbre sobre costos y viabilidad técnica para disminuir carbono; c) implementación y seguimiento. Desafíos de la tarea c: 4) colaboración de la industria en su conjunto para abordar las múltiples fuentes de emisiones. 5) compromiso sostenido de actores internos y externos.

Recuerdo bien que más o menos por 2007 me convertí en uno de los líderes en Danone de México para trabajar en las mediciones y establecimiento tanto de la línea base como en el mapeo y definición de planes de acción y proyectos para el plan de descarbonización con objetivos internos de reducción de 30% de la huella de carbono (CFP) de Danone de México de 2008 a 2011. En nuestras primeras tareas de determinación de la línea base, los algoritmos estaban basados en una hoja de Excel por demás compleja. Pero esos tiempos quedaron atrás.

Como nos comenta Peter Spiller, el carbono es una nueva moneda: a principios de mayo de 2021, su valor en el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones ascendía ya a 50 euros por tonelada métrica. Ante esta necesidad, proveedores reconocidos de sistemas ERP² y nuevas “start-ups”³ ya ofrecen plataformas de contabilidad de carbono. Algunos permiten calcular las emisiones usando facturas de servicios, viajes y patrones logísticos; otros asocian inmediatamente perspectivas sobre la huella de carbono con mercados de compensación. Simultáneamente, los proveedores líderes de sistemas transaccionales tradicionales han comenzado a incorporar la contabilidad de carbono a sus plataformas ERP (por ejemplo, SAP

Business Technology Platform) y de gestión de relaciones con clientes (CRM).⁴

Como comentario al respecto, puedo decir que en México la recuperación de bonos de carbono no es algo muy tangible y sigue siendo muy difícil de calificar. Me parece que en este tema también hay muchas áreas de oportunidad. Pero el mejor enfoque de contabilidad dependerá, naturalmente, de las necesidades específicas de cada organización, las cuales pueden variar según su tamaño, sector y objetivos específicos.

La contabilidad de carbono, especialmente en lo que respecta a las emisiones de alcance 3 es más complicada. Aunque ha habido mejoras importantes, los cálculos de emisiones –en algunos casos– se basan en datos aproximados y factores de emisión estándar, lo que dificulta la precisión. En la cadena de suministro todavía hay áreas de oportunidad para tener información más precisa sobre las emisiones de los productos adquiridos, y muchos proveedores estarán mejorando día a día la claridad sobre sus propias emisiones según se vayan incorporando a la cadena de valor de la descarbonización. A mi entender, aún no hay una metodología uniforme para recopilar y comunicar esta información. Sin embargo, mejorar las emisiones de alcance 3 es posible al elegir proveedores con menores emisiones.

Peter Spiller indica que, para cerrar la brecha de información, se necesita colaboración en la cadena de valor, y hay iniciativas prometedoras en marcha, como el Carbon Transparency Pathfinder. Mientras tanto, muchas empresas están optando por encuestas a sus proveedores más grandes para obtener información sobre emisiones, aunque esto es sólo una solución temporal debido a la falta de comparabilidad y acceso a proveedores de niveles inferiores.

Algunas industrias lácteas en México y en el mundo entero, están implementando diversas estrategias para trabajar en la descarbonización y reducir su huella de carbono. Aquí les comparto algunas de las principales acciones que están llevando a cabo:

² Por sus siglas en inglés Enterprise Resource Planning (ERP) se refiere a un software de planeación de recursos empresariales para gestionar todos los procesos de una organización, tales como los de manufactura y su cadena de suministro, los recursos humanos, la contabilidad y finanzas, etcétera.

³ Anglicismo que se refiere a las empresas de reciente creación, emergentes, con potencial de crecimiento, innovación y uso de tecnología para crear un modelo de negocio escalable y disruptivo.

⁴ CRM o Customer Relationship Management son sistemas informáticos que proveen herramientas para generar y manejar información de clientes actuales y potenciales.

La coordinación entre secretarías de Estado, cámaras industriales, consejos, confederaciones, comisiones, uniones ganaderas, cámaras comerciales, asociaciones de tiendas y consumidores, e instituciones educativas y de investigación del país, es clave para trabajar unidos en busca de un objetivo común: un México más humano y verde





La sostenibilidad en las empresas puede mejorar su eficiencia operativa, reducir consumo de recursos y costos, y generar menos residuos

1. Mejora de la eficiencia energética: muchas industrias lácteas están invirtiendo en tecnologías más eficientes que reducen el consumo de energía en la producción y el procesamiento de productos lácteos.

2. Uso de energías renovables: algunas empresas están adoptando fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, para alimentar sus operaciones, lo que ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

3. Manejo sostenible del ganado y bienestar animal: la mejora en la alimentación, manejo y productividad del ganado pueden reducir las emisiones de metano, un potente gas de efecto invernadero. Esto incluye prácticas como la optimización de la dieta del ganado y la implementación de sistemas de pastoreo más sostenibles e inclusive ahora el uso de algunos aditivos en la alimentación del ganado que reducen las emisiones de metano entérico. Algunos de estos aditivos están ya aprobados en varios países y algunos ya se están probando en México. En México, Alpura fue la primera empresa en certificar establos de vacas lecheras en bienestar animal, y Lala y Nestlé también ya tienen avances tangibles en esta materia.

4. Optimizar y el reducir el consumo de agua: muchas empresas y proveedores tienen ya programas activos de medición y reducción de consumo de agua midiendo y siguiendo la dinámica de sus huellas hídricas. En México ya hay empresas que miden y monitorean continuamente el “ciclo del agua” en sus plantas.

5. Reducción de residuos: las industrias lácteas están trabajando en la minimización de residuos y en la implementación de prácticas de economía circular, donde los subproductos de la producción se reutilizan o se convierten en biogás. Un muy buen ejemplo de esto son los sueros dulces, salados y ácidos que se generan durante la producción de queso. La reutilización de estos sueros dulces se lleva a cabo en México ya desde hace varios años, y de

manera muy eficiente, aunque existen aún oportunidades en los sueros salados y ácidos.

6. Innovación en productos y empaques: productos ricos en proteínas y calcio que, gracias a tecnologías como la nano y ultrafiltración, relativamente nuevas en México, permiten un mejor y más eficiente aprovechamiento de todos los componentes de la leche. En cuanto a empaques, se han logrado avances significativos. Cada día se utilizan plásticos y envases más amigables con el medio ambiente, que se reciclan más, se reutilizan más o son más biodegradables. México se ha convertido en uno de los países que más PET recicla en todo el mundo.

7. Compensación de emisiones: muchas industrias están invirtiendo en proyectos de reforestación y otras iniciativas que ayudan a compensar sus emisiones de carbono.

8. Educación y capacitación: las empresas también están capacitando a sus empleados, a los agricultores y productores de leche sobre prácticas sostenibles que pueden ayudar a reducir las emisiones en toda la cadena de suministro. Un muy buen ejemplo de esto en México son los programas de Agricultura Regenerativa de Danone y de Nestlé, que en años recientes se han implementado en el país.

Estas acciones no sólo ayudan a las industrias lácteas a cumplir con las regulaciones ambientales, sino que también responden a la creciente demanda de los consumidores por productos más sostenibles. ¡Es un paso importante hacia un futuro más verde!

Una empresa láctea que se ha destacado en el mundo y en México, como modelo a seguir en descarbonización, es Danone, ya que ha implementado una serie de iniciativas para reducir su huella de carbono y promover la sostenibilidad en su cadena de suministro. Aquí hay algunas de las acciones que la han posicionado como un referente en este ámbito:

1. Compromiso de carbono neutral: se ha comprometido a alcanzar la neutralidad de carbono en todas sus operaciones para 2030 y en toda su cadena de valor para 2050. En este compromiso, me vienen a la mente dos proyectos muy importantes en México. Uno es la reducción del material plástico en la botella, que para mí ya es “icónica”, de Danup. En 1994, la botella pesaba 16 gramos, y actualmente su peso es de aproximadamente 10 gramos. Esto representa una reducción de 38% en el uso de plástico, lo que también conlleva una disminución significativa en la huella de carbono. El otro proyecto es la concentración de leche entera en establo mediante ósmosis inversa a 2.3. Esta tecnología, en ese entonces totalmente nueva en México, redujo considerablemente el costo de transporte y, por ende, también las emisiones al medio ambiente en más de 50%. Además, permite una reutilización significativa de agua y una disminución notable en la huella de carbono.

2. Energías renovables: ha estado invirtiendo en energías renovables para sus fábricas y operaciones, buscando reducir su dependencia de combustibles fósiles.

3. Manejo sostenible del ganado: Danone trabaja con los agricultores para implementar prácticas de manejo sostenible que reduzcan las emisiones de metano y mejoren la eficiencia en la producción de leche, así como en el bienestar animal.

4. Innovación en productos: ha desarrollado productos que son más sostenibles y ha explorado alternativas a los productos lácteos tradicionales, como las leches vegetales.

5. Transparencia y colaboración: promueve la transparencia en sus prácticas y colabora con diversas organizaciones y comunidades para fomentar la sostenibilidad en la industria láctea.

Estas iniciativas han hecho de Danone un ejemplo a seguir en la industria láctea mundial y en México en términos de descarbonización y sostenibilidad. Sin embargo, hay otras empresas que también están haciendo esfuerzos muy significativos en este sentido. En la sostenibilidad y descarbonización empresarial, la comunicación juega un papel muy importante, y me refiero con esto a la comunicación al interior de las empresas y al exterior con la comunidad.

La comunicación es fundamental en la sostenibilidad y descarbonización empresarial por varias razones. En primer lugar, al interior de la empresa, una buena comunicación asegura que todos los empleados estén alineados con los objetivos de sostenibilidad. Esto fomenta un sentido de pertenencia y compromiso, lo que puede llevar a una mayor colaboración y a la implementación efectiva de prácticas sostenibles.

Por otro lado, la comunicación externa con la comunidad es igualmente crucial. Al compartir los esfuerzos y logros en sostenibilidad y descarbonización, las empresas pueden construir confianza y credibilidad con sus clientes, consumidores, autoridades, inversionistas, proveedores, productores de leche, cámaras industriales, asociaciones, y demás partes involucradas en la cadena de valor del negocio integral. Esto no sólo mejora la imagen de la empresa, sino que también puede inspirar a otros a seguir su ejemplo, creando un impacto positivo mucho más amplio.

Convertirse en un modelo a seguir

La comunicación efectiva es el puente que conecta los esfuerzos internos de sostenibilidad con la percepción y el apoyo de la comunidad, lo que es esencial para el éxito a largo plazo en la sostenibilidad y en la descarbonización.

Danone se ha comprometido a alcanzar la neutralidad de carbono en todas sus operaciones para 2030 y en toda su cadena de valor para 2050

empresarial. Recomienda Spiller: “será menester considerar y actuar con decisión en cada aspecto de la descarbonización, y definir en qué casos liderar la transición solos, colaborar con otros ‘stakeholders’ o dejar el desarrollo de nuevas tecnologías y modelos de negocios en manos de terceros”, donde plantea tres alternativas según el sector y otros factores, como el grado de desarrollo tecnológico:

1. Seguir, si las palancas están fuera de nuestro control o el liderazgo es ejercido por otros actores; en este caso lo que se debe hacer es esperar a que la industria inicie el camino hacia la descarbonización para implementar nuevas tecnologías.
2. Compartir, si las palancas son demasiado grandes para jugadores individuales; donde entonces se deben compartir conocimientos y colaborar facilitando la descarbonización en toda la cadena de valor.
3. Liderar, si las palancas dan ventajas competitivas; y entonces se debe asumir el mando relativo en la reducción de carbono en la cadena de valor.

Formar alianzas en todos estos temas es crucial para lograr los objetivos a nivel nacional. Por ello, la coordinación y armonización a través de entidades como secretarías de Estado, cámaras industriales, consejos, confederaciones, comisiones, uniones ganaderas, cámaras comerciales, asociaciones de tiendas, asociaciones de consumidores, entre otras, así como las instituciones educativas y de investigación del país, es clave para trabajar unidos en busca de un objetivo común: un México más humano y verde.

Un ejemplo de las sinergias y la coordinación entre las empresas y las cámaras industriales es la creación de una nueva comisión en la Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC), llamada SUMABAAR, en octubre de 2021. Esta comisión se dedica a abordar temas relacionados con la sustentabilidad, el medio ambiente, el bienestar animal y la agricultura regenerativa, palabras que dan origen a sus siglas. En ella participan miembros jóvenes y muy dinámicos de diversas empresas del sector que están afiliadas a la cámara.

Conclusiones

La sostenibilidad y la descarbonización son imperativos éticos y ambientales que deben acompañar a cualquier industria, tanto en México como en el resto del mundo. Quiero concluir este capítulo expresando mi agradecimiento a Danone de México y a la UNAM por la invitación a colaborar en este libro y con un pensamiento que ha sido mi inspiración y motivación para participar en todos estos temas, no sólo en Danone, sino también en todas las cámaras e instituciones con las que he tenido la bendición de colaborar.

“La responsabilidad de una empresa no se acaba en las puertas de la fábrica o en la puerta de la oficina. Sus acciones repercuten en toda la comunidad e influyen en la calidad de vida de cada ciudadano [...]. Nuestra responsabilidad no termina en la puerta de nuestra fábrica. Por la energía y materia prima que utilizamos, una compañía puede cambiar la faz de nuestro planeta. Los recursos de energía de la tierra pueden ser limitados, pero los recursos de la humanidad no”, expuso Antoine Riboud en su discurso, en 1972.

Referencias

DSM-FIRMENICH. 2024. Como las vacas pueden ayudarnos a luchar contra el cambio climático. https://www.dsm-firmenich.com/content/dam/dsm/anh/en/documents/dsm-f_Boaver_climage-change_brochure_A4_8pp_ES.pdf

FAO. 2010. New FAO report assesses dairy greenhouse gas emissions. <https://www.fao.org/newsroom/detail/New-FAO-report-assesses-dairy-greenhouse-gas-emissions/en>

Spiller, Peter. 2021. La descarbonización de la cadena de suministro:

cómo hacerla realidad. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/making-supply-chain-decarbonization-happen/es-CL#/>

Tetrapak, Sitio Web Tetrapak, sin fecha. “Posibilitar la transición hacia una producción lechera más sostenible”. Reducción del impacto medioambiental en la industria lechera. <https://www.tetrapak.com/es-mx/sustainability/acting-for-sustainability/moving-food-forward/sustainable-dairy>

“La responsabilidad de una empresa no se acaba en las puertas de la fábrica o en la puerta de la oficina. Sus acciones repercuten en toda la comunidad e influyen en la calidad de vida de cada ciudadano...”

Nuestra responsabilidad no termina en la puerta de nuestra fábrica. Por la energía y materia prima que utilizamos, una compañía puede cambiar la faz de nuestro planeta. Los recursos de energía de la tierra pueden ser limitados, pero los recursos de la humanidad no”

discurso de Antoine Riboud, 1972



5

INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN MÉXICO

Everardo González Padilla¹

José Luis Dávalos Flores¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



En México, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico han fluctuado entre 467.4 millones de ton/año de CO₂e (1990) y 714.04 millones de ton/año de CO₂e (2021)

Uno de los grandes retos de la humanidad es sin duda atender el impacto negativo de las actividades económicas que demanda el desarrollo y confort de las sociedades humanas modernas, como ocurre con las modificaciones de la atmósfera, las cuales están implicando un aumento de la temperatura del planeta y sus secuelas climáticas negativas para muchas formas de vida, incluido el humano mismo, y particularmente las comunidades de menores recursos que, paradójicamente, son las que menos contribuyen al problema dada su baja demanda y acceso a todo tipo de satisfactores. Hoy conforme al informe de 2021 del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), se alcanzaron las concentraciones atmosféricas de CO₂ más altas de los últimos dos millones de años, y las de CH₄ y N₂O más altas de los últimos 800,000 años (IPCC, 2021).

Derivado de la atención a este problema, se han impulsado consensos mundiales, entre los que se destaca identificar y registrar las fuentes y volúmenes de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) en cada país y región, para poder focalizar y jerarquizar las acciones de control de emisiones y la definición de vías de acción y políticas para la atención de este problema global.

En 2015 se llevó a cabo el Acuerdo de París, tratado internacional sobre el cambio climático, mismo que entró en vigor a partir del 4 de noviembre de 2016. Este acuerdo fue adoptado por 196 países dentro de los cuales está México, y su objetivo es limitar el calentamiento global. Para ello, se busca llevar un control de emisiones de gases

de efecto invernadero para alcanzar un clima neutro para mediados del presente siglo.

En México, como en la mayoría de los países del mundo, se ha designado una entidad gubernamental para que, con base en las directrices del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), se responsabilice, entre otras funciones, de integrar el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. Esa institución es el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), adscrito la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual lleva a cabo la integración de su Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) como parte de su compromiso internacional al ser signatario de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

Este inventario se realiza con apego a los criterios y la metodología más reciente que dicta el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Esta metodología está disponible en una serie de informes metodológicos producidos por el Grupo de Trabajo del IPCC sobre Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (TFI – Task Force on National Greenhouse Gas Inventories). Para la integración del INEGYCEI existe una colaboración interinstitucional entre dependencias de la Administración Pública Federal, gobiernos locales, centros de investigación y organismos del sector privado que proporcionan información al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). También existe un *software*

La agricultura, silvicultura y otros usos de tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) representaron, en el bienio 2020-2021, 19% de las emisiones GEI en nuestro país

de inventarios del IPCC que sirve como herramienta para facilitar la presentación de informes por parte de los países integrados en el Acuerdo de París.

SEMARNAT venía integrando el inventario de emisiones y, en 2012, México promulgó la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en la que creaba el Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC) y ponía en operación el INECC en 2013, organismo de investigación del Estado mexicano que genera e integra investigación técnica y científica en materia de ecología y cambio climático, con la finalidad de apoyar la toma de decisiones. En 2014 se publica el Reglamento del Registro Nacional de Emisiones de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero.

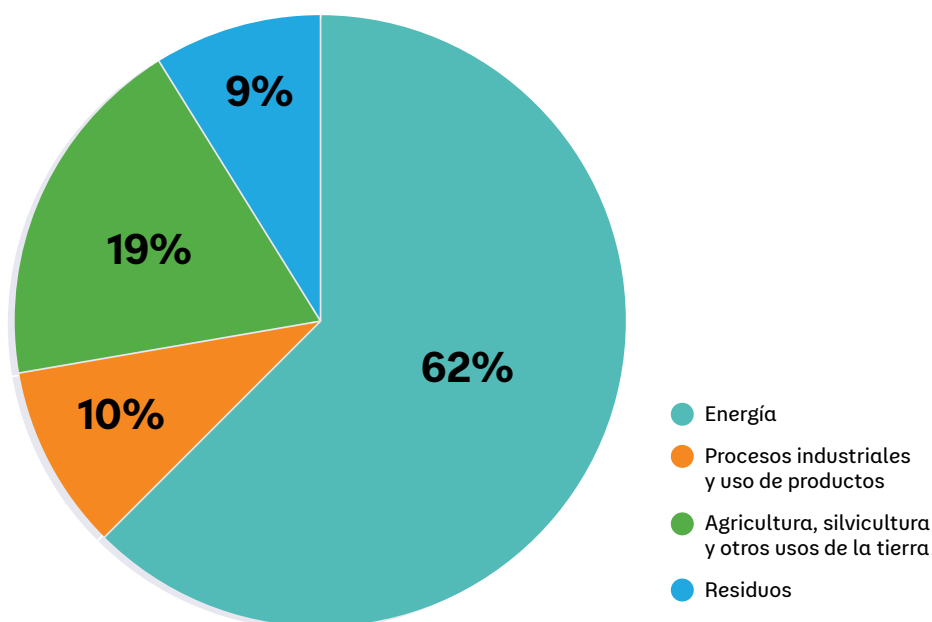
Con base en la información acumulada de 1990 a 2021 y publicada por INECC (2024), se presentan algunos análisis pertinentes de los inventarios oficiales de emisiones y

captura de gases de efecto invernadero (GEI) en un periodo de treinta años, incluyendo tendencias y tasas medias de crecimiento. El análisis se hizo con la información de cada lustro, a partir de 1990.

Las emisiones totales de origen antropogénico, estimadas con la metodología definida por el IPCC han fluctuado entre 467.4 millones de ton/año de CO₂e (1990) y 714.04 millones de ton/año de CO₂e (2021); la tasa media de crecimiento anual (TMCA) ha sido 1.44 %, superior al 1.2 % aproximado de crecimiento de la población, pero inferior al crecimiento del PIB, que fue cercano a 2.4 % en el mismo periodo.

La agricultura, silvicultura y otros usos de tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) representaron, en el bienio 2020-2021, 19% de las emisiones GEI en nuestro país con 135 millones de ton/año de CO₂e en dicho periodo (gráfica 1).

Gráfica 1: Emisiones netas GEI en México en 2020-2021, por sector



Fuente: INECC, 2024

A su vez, la ganadería vacuna representó 76.7% de las emisiones AFOLU (62.2% por fermentación entérica y 14.5% por gestión de estiércol) en los inventarios de GEI nacionales oficiales, con una tendencia creciente entre 1990 y 2022 (gráfica 2).

La pendiente de la regresión de las emisiones totales en los treinta años es de 9,8 millones de ton/lustro (figura 1).

En cuanto a las emisiones AFOLU de GEI, representaron entre 17% (2000) y 24.3% (1990) del total, con TMCA de 0.54% y pendiente de la regresión de 908,000 ton/lustro (figura 1). Es importante destacar que la captura de CO₂e en las áreas forestales, en los años para los que hay información (2000 al 2015), representó entre 145% y 205% de las emisiones de AFOLU. La mayor parte de las emisiones se asociaron con las actividades pecuarias; se estimaron entre 91 (2000) y 111 (2020) millones de ton/año de CO₂e (entre 77% y 83% de AFOLU), con TMCA de 0.5%, muy inferior al crecimiento de más de 2% anual de la actividad, y pendiente de la regresión de 523,000 ton de CO₂e/lustro.

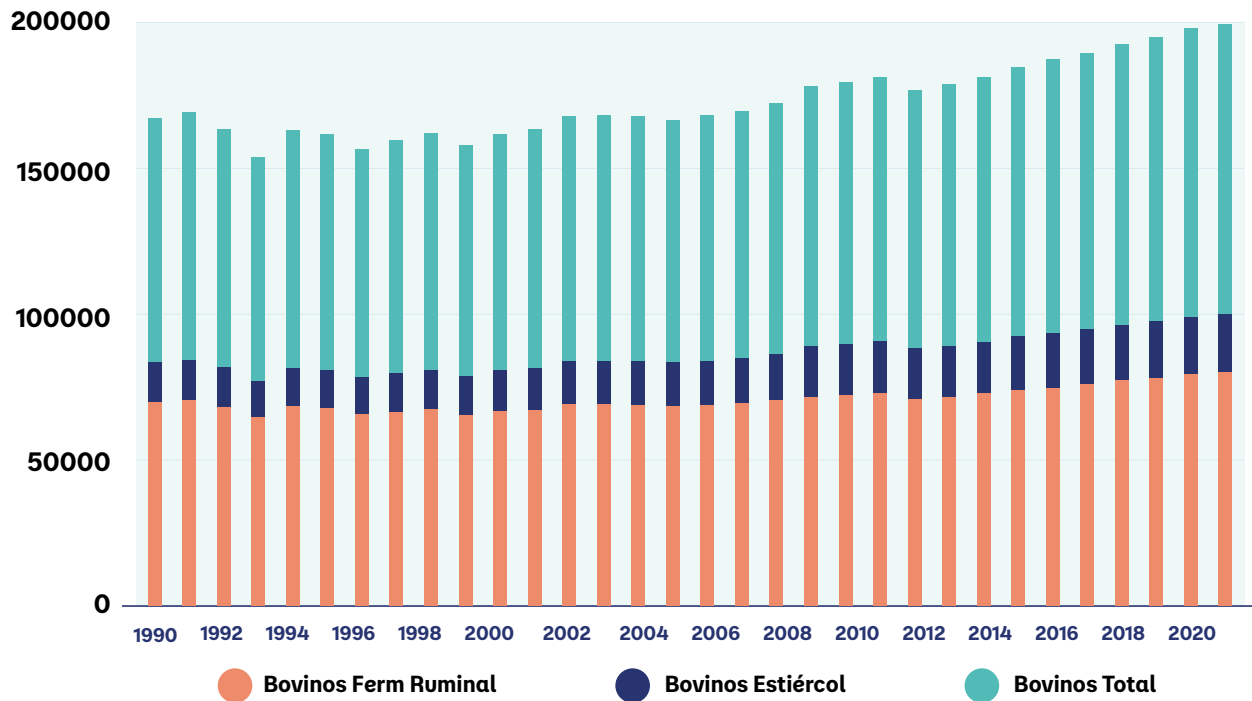
Del crecimiento de las emisiones de GEI de la actividad pecuaria, la mayor parte se generó en los sistemas de producción de carne y leche de bovino, que por los conceptos emisión de GEI por fermentación ruminal y entérica y la

asociada con la gestión del estiércol, representaron entre 70% (2015) y 84% (2000) de las emisiones de AFOLU; las emisiones del sector de bovinos crecieron a TMCA de 0.56% con coeficiente de regresión de 493,000 ton/lustro (figura 1). La emisión de GEI directa de los animales tuvo una TMCA de 0.43%, en tanto que la relacionada con la gestión del estiércol creció con TMCA de 1.18%, lo que denota la intensificación de los sistemas de producción con bajo crecimiento de inventarios (figura 2).

Toda vez que este escrito está orientado al sector lechero, se hizo una estimación sobre qué proporción de las emisiones atribuidas a bovinos está asociada con la producción primaria de leche. Para ello, consideramos la información proporcionada en el capítulo 3 sobre estructura del hato lechero y las directrices propuestas por el IPCC de 2019 que actualizaron las de 2006 para el cálculo de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019). Esa estimación gruesa nos arroja que alrededor de 15% de las emisiones generadas por bovinos en el país, se asocian con la producción de leche.

Concluimos en la necesidad de crear directrices metodológicas y operativas que permitan generar inventarios de emisión de GEI pecuarios con mayor nivel de detalle, en aras de establecer políticas públicas para mitigar y disminuir su generación.

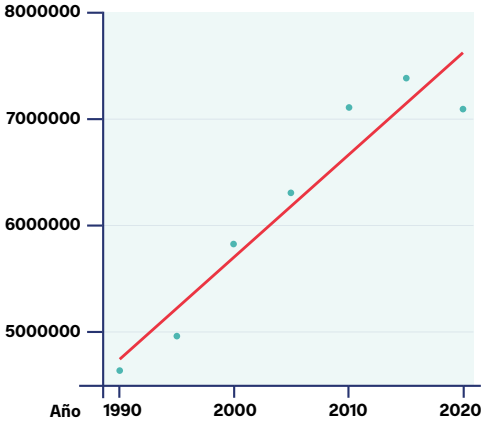
Gráfica 2: GEI en México emitidos por bovinos (Gg de CO₂e)



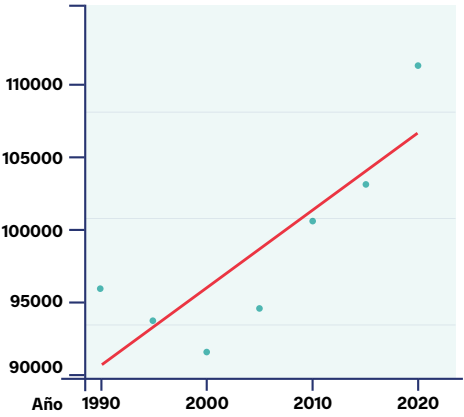
Fuente: INECC, 2024

Figura 1: Emisiones de GEl en México, 1990-2020, miles de ton. CO₂ eq

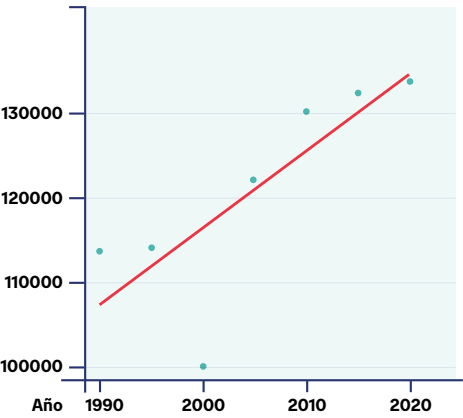
Totales, TMCA = 1.44%. Pendiente= 9,793/5 años



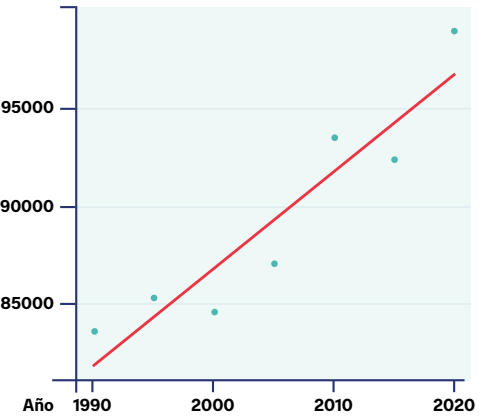
Ganadería, TMCA = 0.50%. Pendiente = 532/5 años



AFOLU, TMCA = 0.54 %. Pendiente = 908/5 años



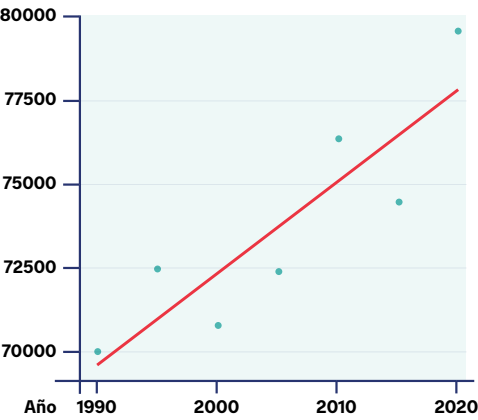
Bovinos + Excretas, TMCA = 0.56%. Pendiente = 493/5 años



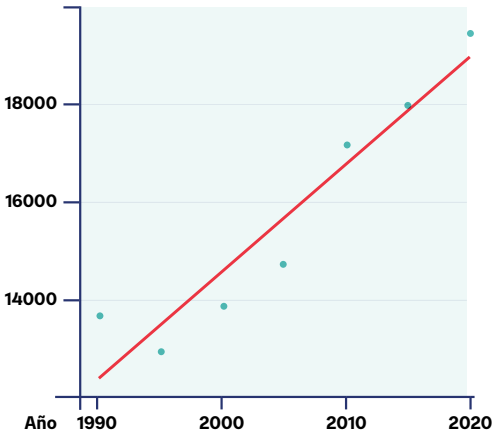
Fuente: Cálculos propios a partir de INECC, 2022

Figura 2: Emisiones de GEl de Bovinos en México, 1990-2020, miles de ton. CO₂ eq

Bovinos, TMCA = 0.43%. Pendiente= 273/5 años



Excreta de bovinos, TMCA = 1.18%
Pendiente= 220/5 años



Fuente: Cálculos propios a partir de INECC, 2022.

**Se estima que alrededor de 15%
de las emisiones GEI generadas
por bovinos en México se asocian
con la producción de leche**

Referencias

FAO and GDP (2019). Climate change and the global dairy sector. Food and Agriculture of the United Nations (FAO) and Global Dairy Platform Inc. (GDP)

Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. (2021). Cambio Climático 2021. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas.

Johnson, K. A.; Johnson, D. E. (1995). Methane Emissions from Cattle. J. Anim. Sci., 73, 2483-2492.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2024). <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>

6

HERRAMIENTAS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN LÁCTEA

Juan Heberth Hernández Medrano¹
Álvaro José Guzmán Daireaux¹

¹Faculty of Veterinary Medicine (UCVM),
University of Calgary, Calgary, AB, T2N 4Z6. Canada



La medición del metano en el ganado lechero es una herramienta esencial para avanzar hacia una producción más sostenible y eficiente

Introducción

El metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero potente, con un impacto en el calentamiento global 28 veces mayor que el dióxido de carbono en un horizonte de 100 años (IPCC, 2007; Gerber *et al.*, 2013). En el contexto de la producción lechera, el metano juega un papel crucial tanto desde una perspectiva ambiental como de eficiencia productiva.

A nivel mundial, se estima que la ganadería es responsable de aproximadamente 14.5% de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de actividades humanas (Gerber *et al.*, 2013). En particular, el ganado bovino lechero contribuye con alrededor de 4% de las emisiones globales de estos gases (Gerber *et al.*, 2013; IPCC, 2007). Este impacto se ve impulsado por el crecimiento de la demanda de productos de origen animal, como la carne y la leche, debido al aumento poblacional y a la occidentalización de las dietas en países asiáticos (FAO, 2016). Este fenómeno genera un incremento en el número de animales de producción y, por ende, en las emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero (Lassey, 2008).

Frente a este escenario, la ganadería enfrenta el reto de mantener su productividad minimizando su impacto ambiental. La mejora en la eficiencia productiva y la optimización del manejo nutricional emergen como estrategias clave para reducir las emisiones sin comprometer la producción de alimentos. Además, el creciente interés en los mercados de carbono y la sostenibilidad ambiental ofrece oportunidades económicas a los productores que implementen estrategias de mitigación, ya que éstas no sólo reducen la huella ambiental, sino que

pueden traducirse en incentivos financieros y una mayor competitividad en mercados con regulaciones ambientales más estrictas.

En México, la ganadería bovina, especialmente la de doble propósito y la de cría en pastoreo, contribuye significativamente a las emisiones de metano (FAO, 2013). Estas emisiones representan un desafío, pero también una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción (Hernández Medrano y Corona Gochi, 2017).

La importancia de medir el metano en el ganado lechero radica en varios aspectos:

- 1. Impacto ambiental:** cuantificar las emisiones permite evaluar el impacto real de la producción lechera en el cambio climático y diseñar estrategias de mitigación efectivas (Gerber *et al.*, 2013).
- 2. Eficiencia productiva:** el metano representa una pérdida de energía para el animal. Medir su producción ayuda a identificar estrategias para mejorar la eficiencia alimenticia y, por ende, la productividad (Johnson y Johnson, 1995).
- 3. Regulaciones y políticas:** muchos países están implementando políticas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La medición precisa del metano es crucial para cumplir con estas regulaciones (UNFCCC, 2014).
- 4. Selección genética:** la producción de metano tiene un componente genético. Su medición permite seleccionar

animales con menor producción de metano, mejorando la sostenibilidad de la producción a largo plazo (de Haas *et al.*, 2011; Garnsworthy *et al.*, 2012).

5. Desarrollo de estrategias de mitigación: la medición precisa del metano es fundamental para evaluar la efectividad de diferentes estrategias de mitigación, como cambios en la dieta o uso de aditivos (Soliva y Hess, 2007).

En resumen, la medición del metano en el ganado lechero es una herramienta esencial para avanzar hacia una producción más sostenible y eficiente, equilibrando la necesidad de abastecer la creciente demanda de productos de origen animal con la urgencia de mitigar el cambio climático.

Principales métodos para estimar metano

La necesidad de entender y mitigar el impacto ambiental de la producción lechera ha impulsado el desarrollo de diversos métodos para estimar las emisiones de metano en el ganado lechero. Cada uno de estos métodos presenta sus propias ventajas, desventajas y aplicaciones específicas, lo que hace que la elección del método adecuado dependa del contexto y los objetivos de la medición.

Uno de los enfoques más precisos y rigurosos para la medición de metano en rumiantes son las cámaras respiratorias (CR), consideradas por muchos como el “estándar de oro” en este campo (Blaxter y Clapperton, 1965). Este método implica confinar al animal en un recinto sellado, donde se monitorea continuamente la concentración de gases en el aire que entra y sale de la cámara. Al analizar la diferencia en la concentración de metano entre el aire entrante y saliente, es posible calcular con gran precisión la producción de metano del animal. La principal ventaja de las cámaras respiratorias radica en su capacidad para proporcionar mediciones precisas y repetibles, permitiendo un control riguroso de las condiciones ambientales (Tremblay & Massé, 2008). Además, este método permite realizar mediciones continuas durante periodos prolongados, lo que proporciona una visión detallada de la producción de metano a lo largo del tiempo. Sin embargo, las cámaras respiratorias también presentan limitaciones importantes. Su alto costo de construcción y mantenimiento las convierte en una opción poco accesible para muchos investigadores y productores (Garnsworthy *et al.*, 2012). Además, el confinamiento del animal en un ambiente restringido puede afectar su comportamiento y reducir su consumo de alimento, lo que a su vez puede influir en la producción de metano (Garnsworthy *et al.*,

2012). Por último, la baja capacidad de procesamiento de las cámaras respiratorias limita el número de animales que pueden ser medidos simultáneamente, lo que dificulta su aplicación en estudios a gran escala.

Para superar algunas de las limitaciones de las cámaras respiratorias, se ha desarrollado la técnica del gas trazador SF_6 , que permite realizar mediciones en condiciones más naturales, como el pastoreo (Johnson *et al.*, 1994). Este método se basa en la liberación controlada de hexafluoruro de azufre (SF_6) en el rumen del animal, utilizando bolos ruminales que liberan el gas a una tasa conocida. El SF_6 , un gas inerte y no tóxico, se mezcla con el aire espirado por el animal, y la relación entre la concentración de SF_6 y la concentración de metano en el aire espirado se utiliza para estimar la producción de metano. La principal ventaja de la técnica del gas trazador SF_6 es su capacidad para realizar mediciones en condiciones de producción reales, sin restringir el movimiento del animal (Bonilla y Lemus, 2012). Esto permite estudiar las emisiones de metano en animales en pastoreo, lo que es especialmente relevante en sistemas de producción extensivos. Además, este método permite medir un mayor número de animales simultáneamente, lo que facilita la realización de estudios a gran escala. Sin embargo, la técnica del gas trazador SF_6 también presenta desventajas importantes. Su precisión es menor que la de las cámaras respiratorias, y la variabilidad en la tasa de liberación de SF_6 puede afectar la exactitud de las mediciones (Hegarty, 2013). Además, este método requiere el manejo frecuente de los animales para la colocación y recuperación de los bolos ruminales y los equipos de muestreo, lo que puede generar estrés en los animales. Por último, el SF_6 es un potente gas de efecto invernadero, lo que plantea preocupaciones ambientales sobre su uso.

En un intento por combinar la precisión de las cámaras respiratorias con la practicidad de la técnica del gas trazador SF_6 , se ha desarrollado el sistema GreenFeed®, una opción automatizada para la medición de metano en condiciones de producción (Zimmerman *et al.*, 2013). Este sistema atrae a los animales a una estación de alimentación, donde se mide el metano en el aire exhalado mientras el animal consume un suplemento alimenticio. El GreenFeed® utiliza un sistema de flujo de aire para capturar y analizar los gases exhalados por el animal, lo que permite mediciones frecuentes y automatizadas. Una de las principales ventajas del sistema GreenFeed® es su capacidad para realizar mediciones en condiciones de producción reales, con un menor estrés para los animales

La necesidad de entender y mitigar el impacto ambiental de la producción lechera ha impulsado el desarrollo de diversos métodos para estimar las emisiones de metano en el ganado lechero

en comparación con otros métodos (Zimmerman *et al.*, 2013). Además, este sistema permite obtener mediciones frecuentes a lo largo del día, lo que proporciona una visión más completa de la producción de metano. Sin embargo, el GreenFeed® también presenta limitaciones importantes. Las mediciones son intermitentes y dependen de la frecuencia de visitas de los animales a la estación de alimentación, lo que puede generar sesgos en los resultados (Hegarty, 2013). Además, el costo inicial del sistema es significativo, lo que limita su acceso para muchos productores e investigadores.

Tratando de reducir estas limitaciones del sistema GreenFeed® y reconociendo la ventaja de la medición directa del metano espirado, un grupo de investigadores del Reino Unido desarrolló un sistema que determina emisiones de metano a través de la toma de una pequeña proporción de aire directamente del comedero durante la ordeña conocido como sistema Sniffer (Garnsworthy *et al.*, 2012). Este método fue desarrollado en un sistema de producción lechera “intensiva” totalmente automatizado (Garnsworthy *et al.*, 2012). Las emisiones de metano se determinan cuando las vacas son alimentadas en el comedero y liberan metano con cada eructo que se mezcla con el aire del comedero. Los sensores succionan una fracción de este aire y miden la cantidad de metano a través de un sensor infrarrojo (1%CH₄; Guardian Plus, Edinburgh Instruments Ltd., Livingston, Reino Unido). La toma de muestra es continua y todas las mediciones son guardadas cada segundo. La información es guardada para cada vaca que se encuentra en la ordeña, con datos generados para cada lactación (Garnsworthy *et al.*, 2012).

Esta información representa una tasa de emisión, o sea, la cantidad de metano emitida durante un periodo de tiempo (i. e. ordeña), con la emisión total determinada mediante ecuaciones derivadas usando cámaras respiratorias (Garnsworthy *et al.*, 2012). A pesar de esto, este sistema ha demostrado su utilidad para evaluar las variaciones individuales y determinar la variación que existe entre animales (cercana al 30%; Garnsworthy *et al.*, 2012), lo que abre las posibilidades para la selección de animales con baja emisión de metano. Aunado a esto, este sistema tiene la ventaja de ser altamente adaptable, de bajo costo y consistente. Esta flexibilidad y bajo costo le dan al sistema un potencial de medición de la emisión de metano en ganado, no sólo en sistemas lecheros intensivos, sino también en sistemas de doble propósito e incluso corrales de engorda.

Gracias a las características del sistema Sniffer, éste ha sido adaptado a las condiciones del trópico mexicano con estudios para evaluar la emisión de metano individual en ganado de doble propósito en pastoreo en regiones tropicales (Bonilla Cárdenas *et al.*, 2017). Esto permitirá conocer la variación individual en estos sistemas e identificar animales con emisiones altas y bajas para tratar aplicar métodos de selección genómica. Además de esto se generará información de los fenotipos usados para el doble propósito, Bos indicus, Bos taurus y sus cruza, sobre la emisión comparativa de metano bajo condiciones de manejo y alimentación similares.

Dentro de los métodos de medición directa de metano espirado están los sensores láser, los cuales utilizan espectroscopía láser de diodo sintonizable (TDLAS) para

medir la concentración de metano en tiempo real (Chagunda *et al.*, 2009). Estos sensores miden la concentración de metano en aire alrededor de la boca del animal mediante mediciones repetidas por 15 a 25 segundos a una distancia de 3 metros, aproximadamente (Chagunda *et al.*, 2009). La concentración determinada y el volumen tidal pulmonar estimado permite determinar la cantidad de metano emitida por el animal. Gracias a la flexibilidad del sistema en cuanto a que se puede medir en diferentes momentos y eventos del día (durante la ordeña, comida y rumia) con el animal parado o echado, permite tener una aproximación a la emisión diaria de metano (Chagunda *et al.*, 2009). Sin embargo, se ha observado que este método tiene varios factores de variación que pueden afectar las mediciones, por lo que información individual para cada animal en varios puntos es difícil de obtener (Hegarty, 2013).

Además de estos métodos directos de medición de metano, también se han desarrollado enfoques indirectos, como los métodos basados en la medición de CO₂ como trazador, la espectroscopía infrarroja y los modelos de predicción. Los métodos basados en CO₂ aprovechan la relación entre la producción de CO₂ y la producción de metano en el rumen para estimar las emisiones de metano. La espectroscopía infrarroja utiliza la absorción de luz infrarroja por el metano para medir su concentración en el aire exhalado por el animal. Los modelos de predicción, por su parte, utilizan variables como la ingesta de alimento, la composición de la dieta y las características del animal para predecir las emisiones de metano. Si bien estos métodos pueden ser más económicos o aplicables a gran escala, su precisión suele ser limitada (Hook *et al.*, 2010; Ricci *et al.*, 2013).

En resumen, la elección del método para estimar las emisiones de metano en el ganado lechero dependerá de los objetivos del estudio, los recursos disponibles y las condiciones de producción. Cada método presenta sus propias ventajas y desventajas, y es importante considerar cuidadosamente estos factores al seleccionar el enfoque adecuado.

Nuevas metodologías para la medición de metano

En la búsqueda de métodos más precisos, eficientes y aplicables para la medición de metano en ganado lechero, la investigación reciente ha explorado nuevas tecnologías y enfoques que prometen superar algunas de las limitaciones de los métodos tradicionales.

Otra tecnología emergente en la medición de metano en ganado es la imagenología hiperespectral. Esta técnica utiliza cámaras especiales que capturan imágenes en múltiples longitudes de onda, lo que permite visualizar y cuantificar las plumas de metano emitidas por los animales (McGinn *et al.*, 2014). Al analizar el espectro de luz reflejada por el metano, es posible determinar su concentración y distribución espacial. La imaginería hiperespectral ofrece la ventaja de ser un método no invasivo y a distancia, lo que permite medir las emisiones de metano sin perturbar a los animales. Además, esta técnica permite medir múltiples animales simultáneamente, lo que facilita la realización de estudios a gran escala (De Figueiredo *et al.*, 2017). Sin embargo, la imaginería hiperespectral también presenta limitaciones importantes. Requiere condiciones ambientales específicas, como cielos despejados y baja humedad, para obtener imágenes claras. Además, la interpretación de los datos puede ser compleja y requerir algoritmos sofisticados.

Los sensores de metano basados en nanotecnología representan otra innovación prometedora en este campo. Estos sensores utilizan nanomateriales, como nanotubos de carbono o nanopartículas metálicas, que cambian sus propiedades eléctricas en presencia de metano (Morgavi *et al.*, 2013). Al medir estos cambios eléctricos, es posible determinar la concentración de metano. Los sensores de metano basados en nanotecnología ofrecen varias ventajas importantes. Su tamaño reducido permite su integración en dispositivos portátiles, como collares o etiquetas auriculares, lo que facilita el monitoreo continuo y de bajo costo de las emisiones individuales. Además, estos sensores son altamente sensibles y presentan una respuesta rápida a los cambios en la concentración de metano. Sin embargo, los sensores de metano basados en nanotecnología aún se encuentran en fase experimental para aplicaciones en ganado, y pueden requerir protección contra interferencias de otros gases.

El análisis de isótopos estables de carbono en el metano proporciona información valiosa sobre el origen del metano y las vías metabólicas involucradas en su producción. Esta técnica mide la relación de isótopos de carbono (¹³C/¹²C) en el metano emitido, utilizando espectrometría de masas de relación isotópica (Kufka *et al.*, 2019). Al analizar esta relación, es posible distinguir entre diferentes fuentes de metano y comprender mejor los mecanismos de producción de metano en el rumen. El análisis de isótopos estables puede ser útil para evaluar la eficacia de estrategias de



Cuadro 1. Resumen de las principales características de los métodos para medir la emisión de metano por animal individual (adaptado de Garnsworthy *et al.*, 2019)¹

MÉTODO	COSTO DE COMPRA ²	COSTO OPERATIVO ²	MANO DE OBRA / MANTENIMIENTO ²	REPETIBILIDAD	ALTERACIÓN COMPORTAMENTAL ³	RENDIMIENTO ANIMAL	GASES MEDIDOS
Cámaras respiratorias (CR)	Muy alto	Alto	Alto	Alta	Alta (ambiente cerrado, restricción de movimiento)	Puede afectar el comportamiento alimentario y reducir el consumo	CH ₄ , CO ₂ , O ₂
Gas trazador SF ₆	Medio - alto	Medio	Medio	Media	Baja (requiere collar y tubo de recolección)	Mínimo impacto, pero el equipo puede causar incomodidad temporal	CH ₄
GreenFeed®	Alto	Medio	Medio - alto	Alta	Moderada (los animales deben acercarse al sistema)	Puede afectar patrones de alimentación	CH ₄ , CO ₂
Sniffer	Bajo	Bajo	Bajo	Media	Ninguna	No afecta el rendimiento	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ , O ₂
Métodos basados en CO ₂ como trazador	Medio	Bajo - Medio	Medio	Media	Baja (no interfiere directamente con el comportamiento animal)	No afecta directamente el rendimiento	CH ₄ , CO ₂
Espectroscopía infrarroja	Medio - alto	Medio	Medio	Media	Baja (sensor remoto, sin contacto directo)	Sin impacto en el rendimiento animal	CH ₄
Sensores láser de metano (TDLAS)	Muy alto	Medio - alto	Medio - Alto	Alta	Baja (no requiere contacto, se usa a distancia)	No afecta el rendimiento animal	CH ₄
Imagenología hiperespectral	Muy alto	Alto	Alto	Alta	Nula (medición a distancia, sin intervención)	Sin impacto en el rendimiento animal	CH ₄
Sensores de metano basados en nanotecnología	Medio	Bajo	Bajo	Media	Baja (sensor portátil, adaptable al entorno)	Sin impacto en el rendimiento animal	CH ₄
Análisis de isótopos estables	Muy alto	Alto	Alto	Alta	Nula (análisis retrospectivo, sin contacto con el animal)	No afecta el rendimiento animal	CH ₄

CH₄ = metano, CO₂ = dióxido de carbono, O₂ = oxígeno.

¹ Los puntajes de cada método se basan en consenso de expertos de Methagene WG2.

² Se evalúan costos de adquisición y operación, mano de obra y mantenimiento, repetibilidad, alteración del comportamiento animal, rendimiento animal y tipos de gases medidos.

³ Comparado con la ausencia de registro de metano: *Bajo* = medición in situ; *Medio* = algún manejo, entrenamiento o cambio en la rutina; *Alto* = confinamiento.

⁴ Únicamente C-Look SimpleScan.

La adopción de estrategias de mitigación respaldadas científicamente y la participación en esquemas de compensación pueden generar beneficios económicos, al tiempo que refuerzan la percepción de la producción lechera como una actividad ambientalmente responsable

mitigación que buscan modificar las vías metabólicas de producción de metano. Sin embargo, esta técnica requiere equipamiento especializado y costoso, y la interpretación de los datos puede ser compleja.

En conclusión, estas nuevas metodologías ofrecen perspectivas prometedoras para mejorar la precisión, la escala y la aplicabilidad de las mediciones de metano en ganado lechero (cuadro 1). La combinación de estas tecnologías con los métodos tradicionales podría proporcionar una comprensión más completa y detallada de las emisiones de metano, facilitando el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas y personalizadas.

Conclusiones

La ganadería, y en particular la producción bovina, es una de las principales fuentes de metano dentro del sector agropecuario a nivel global (FAO, 2016). Debido a su impacto ambiental, se han desarrollado múltiples estrategias para mitigar estas emisiones (Gerber *et al.*, 2013). No obstante, la efectividad de dichas estrategias depende de una medición precisa de las emisiones basales, lo que permite evaluar el impacto real de cada intervención (Soliva y Hess, 2007). Si bien la dieta juega un papel clave en la producción de metano (Johnson & Johnson, 1995), la variabilidad entre individuos dentro de un mismo sistema de manejo sugiere que los modelos predictivos pueden no ser suficientes para estimar con precisión la reducción de emisiones alcanzada mediante distintas medidas (Garnsworthy *et al.*, 2012).

En este sentido, el desarrollo de métodos de medición directa en aire espirado ha facilitado la identificación de animales con menor producción de metano, lo que abre la posibilidad de incorporar este rasgo en programas de selección genética (de Haas *et al.*, 2011; Garnsworthy *et al.*, 2012). Sin embargo, aún existen desafíos en la estimación de emisiones a nivel regional o nacional, donde es necesario contar con datos representativos para la elaboración de inventarios de GEI (Hegarty, 2013).

El crecimiento de la población mundial y la transformación de los hábitos de consumo en diversas regiones están impulsando un aumento en la demanda de productos de origen animal, lo que podría intensificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la ganadería (FAO, 2016; Lassey, 2008). Ante este panorama, mejorar la eficiencia productiva y fomentar una mayor sustentabilidad en los sistemas ganaderos se presentan como estrategias complementarias para reducir el impacto ambiental sin comprometer la rentabilidad del sector (Broom *et al.*, 2013).

Además, el interés creciente por la sostenibilidad y los mercados de carbono ofrece nuevas oportunidades para los productores. La adopción de estrategias de mitigación respaldadas científicamente y la participación en esquemas de compensación pueden generar beneficios económicos, al tiempo que refuerzan la percepción de la producción lechera como una actividad ambientalmente responsable. La medición precisa del metano y la integración de tecnologías innovadoras serán clave para capitalizar estas oportunidades y garantizar un futuro más sustentable para la ganadería lechera.



Referencias

- Blaxter, K. L., & Clapperton, J. L. (1965). Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition*, 19(4), 511–522. <https://doi.org/10.1079/BJN19650046>
- Bonilla, C. J. A., & Lemus, F. C. (2012). Emisión de CH₄ entérico por rumiantes y su contribución al cambio climático y al calentamiento global. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 3(2), 215–216.
- Bonilla Cárdenas, J. A., Román Ponce, S. I., Hernández-Medrano, J. H., Hernández, G. N., Rodríguez Hernández, K., Basurto Gutiérrez, R., Ramírez Rodríguez, E., Arias Chávez, L. E., Villarreal Rodas, J. H., Vega Murillo, V. E., & Ruiz López, F. J. (2017). Medición de emisiones de CH₄ por rumiantes en unidades de producción de leche en México. *Memorias del Taller Avances en Técnicas para Mitigar la Emisión de Gases de Efecto Invernadero por Rumiantes en México*, Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal en Altiplano (CEIEPAA), FMVZ-UNAM, Tequisquiapan, Querétaro, México, 8–9 de junio de 2017, 110–123.
- Broom, D. M., Galindo, F. A., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1771), 2013–2025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>
- Chagunda, M. G. G., Ross, D., & Roberts, D. J. (2009). On the use of a laser methane detector in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 157–160. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.05.009>
- de Haas, Y., Windig, J. J., Calus, M. P. L., Dijkstra, J., de Haan, M., Bannink, A., & Veerkamp, R. F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 6122–6134. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4439>
- de Figueiredo, E. B., Jayasundara, S., Oliveira, B. R., Berchielli, T. T., Andrade, R. R., Wagner-Riddle, C., & La Scala, J. N. (2017). Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 142, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.143>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2013). *FAOSTAT Emissions Database*. Rome, Italy. Retrieved February 23, 2015, from <http://faostat.fao.org/>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). *Climate is changing. Food and agriculture must change too*. Rome, Italy.
- Garnsworthy, P. C., Craigon, J., Hernández-Medrano, J. H., & Saunders, N. (2012). On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 95(6), 3166–3180. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4605>
- Garnsworthy, P. C., Difford, G. F., Bell, M. J., Bayat, A. R., Huhtanen, P., Kuhla, B., Lassen, J., Peiren, N., Pszczola, M., Sorg, D., Visker, M. H. P. W., & Yan, T. (2019). Comparison of methods to measure methane for use in genetic evaluation of dairy cattle. *Animals*, 9(10), 837. <https://doi.org/10.3390/ani9100837>
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Hegarty, R. S. (2013). Applicability of short-term emission measurements for on-farm quantification of enteric methane. *Animal*, 7(s2), 401–408. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000732>
- Hernández-Medrano, J. H., & Corona, L. (2018). El metano y la ganadería bovina en México: ¿Parte de la solución y no del problema? *Agro Productividad*, 11(2).
- Hook, S. E., Denis, A., Wright, G., & McBride, B. W. (2010). Methanogens: Methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea*, 2010, 945785. <https://doi.org/10.1155/2010/945785>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories* (Vol. 4). Agriculture, forestry, and other land use. IPCC, Hayama, Japan.
- Johnson, K. A., Huyler, M. T., Westberg, H. H., Lamb, B. K., & Zimmerman, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using an SF₆ tracer technique. *Environmental Science & Technology*, 28(2), 359–362. <https://doi.org/10.1021/es00051a025>
- Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73(8), 2483–2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>
- Kufka, D., Bucha, M., Pleśniak, Ł., & Jędrysek, M. (2019). Stable isotopes of C and H in methane fermentation of agriculture substrates at different temperature conditions. *Open Geosciences*, 11(1), 471–481. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0038>
- Lassey, K. R. (2008). Livestock methane emission and its perspective in the global methane cycle. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 114–118. <https://doi.org/10.1071/EA07218>
- McGinn, S. M., Beauchemin, K. A., Coates, T., & McGeough, E. J. (2014). Cattle methane emission and pasture carbon dioxide balance of a grazed grassland. *Journal of Environmental Quality*, 43(3), 820–828. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.08.031>
- Morgavi, D. P., Kelly, W. J., Janssen, P. H., & Attwood, G. T. (2013). Rumen microbial (meta)genomics and its application to ruminant production. *Animal*, 7(1), 184–201. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000419>
- Ricci, P., Rooke, J. A., Nevison, I., & Waterhouse, A. (2013). Methane emissions from beef and dairy cattle: Quantifying the effect of physiological stage and diet characteristics. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5379–5389. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6493>
- Soliva, C. R., & Hess, H. D. (2007). Measuring methane emission of ruminants by in vitro and in vivo techniques. In H. P. S. Makkar & P. E. Vercoe (Eds.), *Measuring methane production from ruminants* (pp. 15–31). Springer.
- Tremblay, F. J. B., & Massé, D. I. (2008). Instrumentation for precise quantification of methane emissions for dairy herd. *Canadian Biosystems Engineering*, 50, 7.21–7.28.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2014). *Kyoto Protocol – Doha Amendment 2014*. Retrieved June 30, 2015, from http://unfccc.int/kyoto_protocol/doha_amendment/items/7362.php
- Zimmerman, S., Michal, J. J., White, R., Johnson, K. A., Guerouali, A., & Zimmerman, P. (2013). Evaluation of a novel system to measure enteric methane emissions from beef cattle on pasture. *Abstract accepted in the American Dairy Science Association/American Society of Animal Science Joint Meeting*, 8–12 July 2013, Indianapolis, Indiana.

7

BIENESTAR ANIMAL Y SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN LECHERA

Karla Elena Herrera Hidalgo^{1,2}

Francisco Aurelio Galindo Maldonado^{1,2}

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México

²Centro Colaborador en Bienestar Animal y Sistemas Pecuarios Sostenibles
para la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA)



Los consumidores se preocupan no sólo por la calidad nutricional de los productos que consumen, sino también por la manera en cómo se producen desde un punto de vista ético, social, económico y ambiental

1. Introducción

Los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2024) son un llamado mundial para equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental. Entre los ODS se incluyen a la seguridad alimenticia, consumo responsable, desarrollo de comunidades sustentables, mitigación del cambio climático, entre otros (ONU, 2024). Aunque no se incluye el bienestar animal de manera explícita en los ODS, el cumplimiento de las recomendaciones en la materia por parte de la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA) permite a la vez el cumplimiento de la mayoría de los ODS propuestos.

Por otro lado, los conceptos de Una Salud y Un Bienestar establecen los vínculos entre la sanidad animal, la salud de los seres humanos y la salud ambiental. Actualmente, es de primordial importancia la articulación de políticas públicas integrales a nivel global a través de los organismos intergubernamentales como la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Galindo *et al.*, 2024a). Esto permite a su vez cumplir con los ODS, ya que a través de este enfoque se busca el desarrollo de la agricultura sustentable para el control de enfermedades zoonóticas, combatir la resistencia antimicrobiana, asegurar la inocuidad de los alimentos, la salud y el bienestar de los animales, y prevenir las amenazas medioambientales (FAO, 2025).

Cada vez es más evidente que los consumidores de todo el mundo se preocupan no sólo por la calidad nutricional de los productos que consumen, sino también por la manera en cómo se producen estos productos desde un punto de vista ético, social, económico y ambiental (Hyland *et al.*, 2022; Miranda-De la Lama *et al.*, 2017; Pulina *et al.*, 2022). México no es la excepción, pues se ha demostrado que los consumidores muestran una alta empatía hacia el bienestar mental y emocional de los animales y sus formas de producción (Miranda-De la Lama *et al.*, 2017).

En este capítulo abordaremos los aspectos clave para la evaluación del bienestar animal y de esta manera mejorar la salud del ganado lechero para transitar a una producción más eficiente, ética y sostenible.

2. Evaluación científica del bienestar animal

El bienestar animal (BA) se define como el estado de un individuo con relación a sus intentos por afrontar su ambiente (Broom, 2014). Es un concepto objetivo, basado en ciencia, que puede medirse cuantitativamente en escalas de positivo a negativo. La OMSA adopta este enfoque para usar el término de BA de manera práctica, el cual se encuentra publicado en el Código Sanitario para los Animales Terrestres (OMSA, 2024): y define el término como “el estado físico y mental de un animal en relación con las condiciones en las que vive y muere”, siendo una de las prioridades de la OMSA para la elaboración de normas internacionales (Galindo *et al.*, 2024b).

Los bovinos experimentan estados emocionales que determinan sistemas biológicos de respuesta a su entorno

La evaluación del bienestar animal puede llevarse a cabo mediante indicadores biológicos, usando estudios de comportamiento y fisiología animal, así como también el análisis de los efectos de la actividad prolongada de estos sistemas biológicos en respuesta al ambiente. Las mediciones de bienestar son las siguientes (Broom, 2024):

- Indicadores fisiológicos del placer
- Indicadores conductuales del placer
- Hasta donde las conductas fuertemente preferidas pueden expresarse
- Variedad de conductas normales mostradas o suprimidas
- Hasta donde los procesos fisiológicos normales son posibles
- Grado de conductas de aversión mostradas
- Mecanismos fisiológicos para enfrentar el ambiente
- Inmunosupresión
- Prevalencia de enfermedad
- Intentos conductuales para enfrentar el ambiente
- Patología conductual
- Cambios cerebrales, i. e. indicadores de auto-narcotización
- Prevalencia de daño corporal
- Habilidad de crecimiento o de reproducción reducida
- Expectativa de vida reducida

Basándose en estos indicadores biológicos de BA, se ha desarrollado un marco conceptual que permite su evaluación práctica. Este modelo se conoce como los cinco dominios: 1) nutrición, 2) ambiente, 3) salud, 4) interacciones conductuales y 5) estado mental (Mellor *et al.*, 2020). Los primeros tres dominios se centran en aquellos factores que pudieran afectar la estabilidad interna del organismo, lo que nos llevaría a diferentes respuestas fisiológicas y de comportamiento para corregir dicho desbalance en el

organismo; por ejemplo, restricción de agua y alimento, altas temperaturas, substrato inadecuado, enfermedades agudas o crónicas, genética. El cuarto dominio se refiere a los factores situacionales, busca evaluar la expresión de los diferentes comportamientos al verse afectado el organismo por el ambiente, otros animales y/o la interacción con el ser humano (Mellor, 2016). Finalmente, el quinto dominio evalúa el estado mental del animal derivado de las experiencias positivas o negativas generadas por aspectos internos y/o externos considerados en los primeros cuatro dominios; por ejemplo, hambre, dolor, ansiedad, estrés (Mellor, 2016; Mellor *et al.*, 2020).

Los programas de certificación de la Unión Europea se han desarrollado a partir de protocolos objetivos y prácticos para evaluar el bienestar animal. Entre los ejemplos más aplicados se encuentran los proyectos Welfare Quality® (WQ) (Welfare Quality Network, 2023) y AWIN® (Animal Welfare Indicators) (AWIN, 2015). Estos protocolos integran indicadores basados en el ambiente (como las condiciones de alojamiento y alimentación) y en el animal (salud y comportamiento). Su diseño práctico y sencillo ha permitido que sean herramientas útiles y accesibles para utilizar en granja.

3. Problemas de conducta y bienestar en ganado lechero

3.1. Agresión y competencia social

Los bovinos, al igual que todas las especies de vertebrados, son seres que experimentan estados emocionales que determinan sistemas biológicos de respuesta a su entorno, que implican evaluar situaciones, recordar experiencias pasadas y tomar decisiones basadas en ellas (Broom, 2014). En condiciones naturales, los bovinos forman grupos y vínculos bien establecidos, incluido el vínculo madre-cría y relaciones de dominancia-subordinación. Cambios en el entorno físico y social de la estabulación o del manejo zootécnico del sistema (tanto intensivo como extensivo en producción), tales como el reagrupamiento de vacas en

producción, separación de grupos, entre otros, provocan la ruptura de la estructura social de los hatos lo que resulta en un aumento en la frecuencia de interacciones agresivas, muchas veces con contacto físico.

En grupos hacinados, esto se exagera por la falta de reconocimiento individual y la imposibilidad de predecir la forma de interactuar con el resto del hato. Esta situación de estrés social no sólo afecta su salud, sino también el rendimiento productivo, causando una tasa de crecimiento y condición corporal baja, infertilidad, inmunosupresión y susceptibilidad a enfermedades (Trevisi y Bertoni, 2009). Además, el aumento en agresiones y la ruptura de jerarquías lineales da como resultado una asincronía de las conductas de mantenimiento y esto a su vez aumenta la variación individual en los tiempos de alimentación, descanso y rumia en las vacas.

Esta situación es todavía más patente si no se cuidan aspectos de espacio y calidad de los echaderos en los

establos, ya que se puede dar una competencia de recursos en cuanto al espacio, número de echaderos, sombra, alimento, bebederos, etcétera (figura 1) (Von Keyserlingk *et al.*, 2009; Adamczyk *et al.*, 2015). Cuando se cumplen las necesidades de alojamiento y alimento, las interacciones afiliativas, como es el acicalamiento entre los miembros de la manada, promueven estados emocionales positivos y mejora la cohesión del grupo (Améndola *et al.*, 2016; Galindo *et al.*, 2024b).

En sistemas estabulados se recomienda el uso de cepillos para facilitar el acicalamiento de los animales (Nielsen *et al.*, 2023). Estudios recientes han demostrado que existen diferencias individuales entre los miembros de la manada para enfrentar las dificultades ambientales que llegan a presentar, existiendo individuos proactivos o miedosos, lo que origina diferencias en el consumo de alimento (Schwanke *et al.*, 2024) o tiempos de descanso entre los individuos (Cortés Fernández de Arcipreste *et al.*, 2018).

Figura 1. Competencia por espacios para el descanso



3.2. Dolor

En los últimos años se ha visto un desarrollo considerable en la investigación para evaluar el dolor en los animales. Dentro de los métodos reportados, existen los análisis de indicadores fisiológicos (variaciones en los parámetros fisiológicos) y la observación de respuestas

conductuales (Fischer-Tenhagen *et al.*, 2022; Steagall *et al.*, 2021; Whittaker *et al.*, 2023). Aunque muchas veces, los bovinos no suelen expresar el dolor de manera evidente, poseen una alta densidad de nociceptores para responder a los estímulos térmicos, mecánicos y químicos (Appleby *et al.*, 2018).

Los indicadores más utilizados para evaluar el dolor son: disminución en la locomoción, en las interacciones con otros animales y en el consumo del alimento, cambios de las posturas normales y de los indicadores fisiológicos y mala condición del pelaje (Hudson *et al.*, 2008). Por ello, el control de dolor es importante a través del uso de analgésicos durante el tratamiento de enfermedades infecciosas, como la metritis y las enfermedades respiratorias, así como el uso de anestesia local en procedimientos comunes como el desbotone, el descorne y la castración (Zoltick *et al.*, 2024).

3.3. Cojeras y conductas de reposo

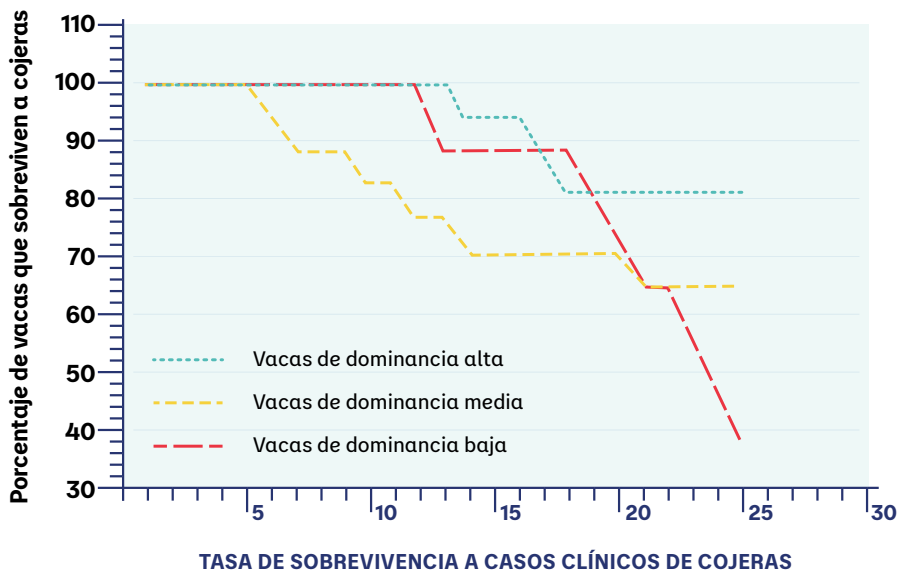
Las cojeras representan uno de los principales problemas de bienestar en el ganado lechero ya que provoca dolor, reducción de la movilidad y disminución de la productividad. Algunos estudios reportan que las cojeras pueden llegar a reducir en un 20% la producción de leche (Garvey, 2022). Los problemas locomotores tienen un origen multifactorial. Factores de riesgo como los tipos de piso (i. e. superficies duras y húmedas), el manejo abrupto, las dietas, la genética y las características intrínsecas del animal, incluyendo su edad y etapa productiva (Von Keyserlingk *et al.*, 2009). El descanso es vital para mantener la salud física de las pezuñas. La jerarquía social del hato juega un papel importante en la aparición de estos problemas podales, ya que los animales de menor rango jerárquico suelen tener menos acceso a espacios cómodos para descansar. Esto los obliga a permanecer de pie por más tiempo en superficies duras, lo que aumenta su predisposición a desarrollar enfermedades podales (figura 2) (Galindo y Broom, 2000; Temple *et al.*, 2016).

La conducta de descanso o reposo en las vacas lecheras es de primordial importancia. Por un lado, el aporte de nutrientes a la ubre se incrementa a medida que la calidad del descanso aumenta; además, la susceptibilidad a cojeras y mastitis se vincula directamente con la posibilidad de las vacas lecheras para regular los episodios de descanso continuo y los tiempos dedicados a las conductas de sueño, rumia y alimentación. Es indispensable que las vacas puedan echarse en espacios cómodos entre 10 y 12 horas al día, sin competencia con otros individuos, ni estrés social (Nielsen *et al.*, 2023; Temple *et al.*, 2016). Al cumplir con este tiempo de manera natural, pueden realizar actividades esenciales como rumiar, alimentarse y dormir. Sin embargo, hay estudios que demuestran lo contrario en el sentido de que, en promedio, las vacas en producción de un establo lechero dedican a descansar 8 horas o menos, lo que las predispone a estrés de tipo social y a diferentes tipos de cojeras y mastitis (Galindo y Broom, 1993, 2000). Por ello, es importante garantizar el tiempo total de descanso (Cortés Fernández de Arcipreste *et al.*, 2018; Tucker *et al.*, 2021; Weary y Tucker, 2003). Al mejorar las instalaciones para su descanso, se ha visto que la producción de leche puede aumentar hasta un 26% (Temple *et al.*, 2016).

Para reducir el riesgo de cojeras en el ganado lechero, se pueden implementar las siguientes estrategias (Galindo y Broom, 2000; Nielsen *et al.*, 2023; von Keyserlingk *et al.*, 2009):

- Asegurar que haya al menos un cubículo –idealmente 1.5– disponible por cada vaca presente en el hato
- Mantener limpieza de las instalaciones

Figura 2. Curvas de Supervivencia a casos clínicos de cojeras para los tres grupos de dominancia de un establo lechero



Fuente: Galindo & Broom, 2000.

- Recorte de pezuñas
- Proveer suficiente espacio individual en comederos y separaciones individuales para evitar agresiones en la línea del comedero
- Proveer dietas equilibradas en cuanto forraje y concentrado
- Permitir el acceso al pastoreo

3.4. Mastitis

La mastitis es una de las enfermedades más comunes y costosas en la industria lechera. Se caracteriza por la inflamación y el dolor en la glándula mamaria. Existen diferentes formas de presentación, desde subclínicas leves hasta casos clínicos graves. Las bacterias más comunes son *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus uberis* y *Escherichia coli*. *Staphylococcus aureus* y *Streptococcus uberis*, las cuales son considerados agentes contagiosos.

Esto quiere decir que se transmiten de una vaca a otra; mientras que *E. coli* generalmente se transmite a partir de ambientes contaminados debido a la mala higiene durante el ordeño, alojamientos sucios y húmedos, heridas en la ubre y el estrés que debilita el sistema inmune de las vacas (Nielsen *et al.*, 2023). En la práctica se utilizan antibióticos intramamarios y medicamentos antiinflamatorios para su tratamiento, pero es fundamental prestar atención a los tiempos de retiro de la leche para evitar su contaminación.

La mastitis genera altos costos para el productor, lo cual podría prevenirse si se implementan las siguientes recomendaciones (Peters *et al.*, 2015; Rowbotham y Ruegg, 2016):

- Buenas prácticas de higiene antes, durante y después del ordeño.
- Mantener camas limpias y secas.
- Utilizar desinfectantes para pezones antes y después del ordeño.
- Recuento de células somáticas para detectar casos subclínicos de manera temprana.
- Mantener a los animales libres de estrés y proporcionarles una dieta equilibrada para fortalecer su sistema inmunológico.

3.5. Becerro

De manera natural, se establece un vínculo entre la vaca y su cría. Los cuidados parentales comienzan desde el parto, cuando la madre busca un lugar aislado para parir y mantenerse alejada de la manada, fortaleciendo así su

vínculo con el becerro (Jensen, 2011). Después de una o dos semanas, el becerro se integra al resto del grupo social, donde comienza a socializar a través del juego con otros miembros.

El destete se da de manera natural entre los 7 y 14 meses de vida (Grandin, 2000), cuando el becerro logra desarrollar las habilidades sociales y de supervivencia aprendidas de su madre (Galindo *et al.*, 2024b). Sin embargo, en la industria lechera, es común que ocurra un destete temprano, incluso durante las primeras horas de vida (AHAW *et al.*, 2023; Jensen, 2018). Esta práctica origina una serie de problemas en la cría incluyendo estrés por asilamiento, estereotipias y conductas redirigidas, hambre y enfermedades infecciosas.

3.5.1. Separación temprana y aislamiento: es común que los becerros experimenten estrés por aislamiento cuando son alojados en jaulas individuales, lo que limita su socialización y el juego con otros individuos (Jensen, 2018). Otro comportamiento afectado por esta práctica es el acto de mamar. Los becerros tienen una fuerte necesidad de succión, y cuando no pueden satisfacerla, suelen redirigirla hacia otros objetos, lo que puede derivar en estereotipias. En sistemas de alojamiento grupal, también pueden succionar la boca, orejas, ombligo, escroto, prepucio o ubre de sus compañeros, causando lesiones en estas áreas (Galindo *et al.*, 2024b). Para reducir los efectos del estrés por separación y aislamiento se recomienda sistemas de crianza en parejas o en pequeños grupos, el uso de mamilas que imiten la succión natural y el enriquecimiento ambiental para ayudar a disminuir la ansiedad y el comportamiento redirigido (AHAW *et al.*, 2023).

3.5.2. Hambre: la restricción de leche no sólo tiene repercusiones conductuales, como el aumento de vocalizaciones, sino que también afecta la sensación de saciedad y el crecimiento del becerro. Con el objetivo de promover el consumo temprano de alimento sólido en la industria lechera, los becerros suelen recibir sólo 10% de su peso vivo (PV) en leche, aproximadamente la mitad de sus requerimientos nutricionales; sin embargo, en la práctica, los becerros requieren tiempo para adaptarse al consumo de sólidos, por lo que se ha visto que no logran cubrir sus necesidades energéticas con la cantidad de leche que se les ofrece (De Paula Vieira *et al.*, 2008). Por ello, se recomienda aumentar la ingesta de leche al 20% del PV al menos durante las primeras cuatro semanas (AHAW *et al.*, 2023) y extender el destete hasta las semanas 12 o 13. Además, el uso de alimentadores automáticos permite un manejo más preciso, ya que monitorean las necesidades individuales de

cada becerro y ajustan la edad de destete en función de su desarrollo y consumo de alimento sólido (De Paula Vieira *et al.*, 2008).

3.5.3. Neumonía y diarreas: el estrés por la separación de la madre y el manejo que se da al recién nacido (i. e. alimentación y la higiene), tiene un impacto importante en la aparición de enfermedades respiratorias y digestivas. En especial el consumo del calostro de buena calidad es muy importante para la transferencia de anticuerpos. Estudios han demostrado que la suplementación con calostro hasta los 14 días de edad contribuye a la prevención de enfermedades como la neumonía y la diarrea en becerros (Chamorro *et al.*, 2017). Además, se ha observado una mayor prevalencia de diarrea en becerros criados artificialmente en comparación con aquellos que permanecen con sus madres (Hillmann *et al.*, 2019). Mantener a estos animales jóvenes con el sistema inmune fuerte es de suma importancia, ya que estas enfermedades infecciosas pueden ocasionar signologías en los becerros, como depresión, fiebre, pérdida del apetito, deshidratación, e incluso la muerte. En la práctica se suele abusar del uso de antibióticos; sin embargo, es posible controlar estas enfermedades mediante buenas prácticas de manejo, tales como la higiene y limpieza de las instalaciones, buena calidad en la cama, buena ventilación y temperatura de instalaciones, el adecuado suministro de calostro, así como una alimentación con leche en cantidad y calidad óptimas (AHAW *et al.*, 2023; Renaud *et al.*, 2018).

4. Hacia una producción lechera del futuro: integrando el bienestar animal a los indicadores de sostenibilidad.

“Un sistema pecuario es sostenible si es aceptable hoy y sus efectos esperados lo serán en el futuro, en particular con relación a la disponibilidad de recursos, consecuencias de su funcionalidad y moralidad de su acción”
(Broom *et al.*, 2013)

Los efectos negativos que la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático están ocasionando a nivel global es cada vez más evidente, afectando la salud y bienestar de la sociedad de todos los países. En México, la tasa de deforestación y la generación de gases de efecto invernadero (GEI) contribuyen a la pérdida de servicios ecosistémicos a nivel global.

Mejorar la eficiencia alimentaria es una estrategia para optimizar la producción, reducir el uso de insumos y disminuir las emisiones de GEI (Llonch *et al.*, 2015, 2017).

No obstante, es esencial considerar el bienestar animal como un componente clave de la producción pecuaria sostenible (Broom *et al.*, 2013). Problemas de BA no sólo afectan la salud y productividad de los animales, sino que también pueden incrementar indirectamente las emisiones de GEI al aumentar el número de animales descartados y productos decomisados (Llonch *et al.*, 2016). Además, cuando los animales están libres de estrés, su digestión es más eficiente, lo que mejora la conversión alimenticia y reduce la producción de metano entérico (Llonch *et al.*, 2016). De igual forma, un manejo que promueva la relación madre-cría mejora la tasa de supervivencia de las crías, promoviendo la productividad del sistema y por lo tanto, la reducción de las emisiones de GEI (Llonch *et al.*, 2017).

El mejoramiento genético y la adaptación al ambiente es uno de los principales desafíos en las unidades de producción en México. Factores ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación y la presión atmosférica pueden influir significativamente en la fisiología y el comportamiento de los animales, afectando su productividad.

Es importante destacar que las vacas altas productoras de leche requieren mayores cantidades de energía para poder expresar plenamente su capacidad productiva, lo que implica un desafío adicional en términos de manejo y nutrición (Hernández-Hernández *et al.*, 2016) y presentan menor adaptación a temperaturas ambientales elevadas, lo que las lleva a presentar mayor estrés térmico (Hayes *et al.*, 2013; Llonch *et al.*, 2017). En este sentido, resulta clave enfocarse en la selección de animales que se ajusten de manera óptima a las condiciones climáticas propias de cada región. Por ejemplo, el ganado cebuino *Bos indicus* posee una mayor tolerancia a temperaturas altas en comparación con el europeo *Bos taurus*, lo que lo hace una alternativa más adecuada para áreas cálidas (Blanco-Penedo *et al.*, 2020; Hayes *et al.*, 2013; Temple y Manteca, 2020).

Por otro lado, en sistemas extensivos de producción, los pastizales de monocultivo están asociados con impactos negativos para el medio ambiente (Von Keyserlingk *et al.*, 2013). Estos sistemas se han asociado a la deforestación, la pérdida de biodiversidad (Van Oudenhoven *et al.*, 2012), la emisión de gases de efecto invernadero (Naranjo *et al.*, 2021), contaminación de agua y a un mayor riesgo de brotes de enfermedades infecciosas emergentes provenientes de la fauna silvestre (Roche *et al.*, 2020). Entre 2001 y 2023, se deforestaron en nuestro país aproximadamente 200,000

Los sistemas agroforestales representan una alternativa sostenible de producción como una opción ecológica y económicamente viable

hectáreas por año, de las cuales 73% se destinaron al uso de pastizales (SNMF-CONAFOR, 2025). Por lo tanto, es esencial considerar no sólo la productividad; sino el bienestar animal y las implicaciones ambientales de las prácticas ganaderas.

En este sentido, los sistemas agroforestales representan una alternativa sostenible de producción (Broom *et al.*, 2013; Flores-Coello *et al.*, 2023; Mancera *et al.*, 2018; Pérez-Lombardini *et al.*, 2021). Estos sistemas de uso de suelo combinan árboles, cultivos y/o animales, lo que los convierte en una opción ecológica y económicamente viable (Broom *et al.*, 2013). Además, los sistemas agroforestales favorecen los servicios ecosistémicos al contribuir a la reducción de los impactos negativos sobre el medio ambiente. Entre sus beneficios se destacan la fijación de carbono, la conservación de la biodiversidad, la filtración del agua, el aumento de la fertilidad del suelo, una disminución de las emisiones de metano y mejores niveles de bienestar animal, en comparación con los sistemas convencionales de pastizales en monocultivo (Flores-Coello *et al.*, 2023; Murgueitio *et al.*, 2015; Pérez-Lombardini *et al.*, 2021; Silva-Cassani *et al.*, 2022).

Recientemente, se han desarrollado tecnologías innovadoras para evaluar el bienestar animal. Estas herramientas permiten monitorear parámetros conductuales y fisiológicos, tales como tiempos en locomoción, descanso, rumia, temperatura corporal y las emisiones respiratorias; lo que ayuda a evaluar cómo los animales afrontan cambios en su entorno. Este enfoque conocido como ganadería de precisión, permite monitorear la salud, bienestar y requerimientos alimenticios de los animales, lo cual ayuda para la toma de decisiones que permitan mejorar la eficiencia del sistema desde un punto de vista económico, productivo y ambiental (Niloofar *et al.*,

2021). Además, al integrar los datos de bienestar animal recabados de múltiples granjas, es posible desarrollar modelos matemáticos que simulen los posibles escenarios que logren el equilibrio entre productividad y preservación de los ecosistemas (Blanco-Penedo *et al.*, 2020; Niloofar *et al.*, 2021).

El lograr combinar la ganadería de precisión con los sistemas agroforestales podría ser fundamental para lograr una ganadería más integrada y sostenible en el futuro, mejorando así la eficiencia productiva, bienestar animal y conservación de los ecosistemas.

Conclusiones

Para hablar de bienestar animal de una forma integral es necesario entender el comportamiento y fisiología natural de la especie y de los individuos. A partir de este conocimiento, se pueden establecer prácticas de manejo que garanticen su bienestar y, al mismo tiempo, promuevan una producción sostenible de leche. Cada vez es mayor el impacto que genera el etiquetado de los productos que muestra la forma de producción de los alimentos, a través de procesos éticos tanto para el productor, el animal y el ambiente, en la decisión de compra del consumidor. Por lo que la implementación de protocolos de evaluación del bienestar animal y reducción de huella ambiental serán clave para la certificación de estos productos. Es por eso que es necesario el desarrollo de nuevas prácticas que promuevan el bienestar animal y la conservación de los ecosistemas. La adopción de los sistemas agroforestales permite mejorar la calidad de vida de los animales y la sostenibilidad del sistema productivo. Además, la diversificación de productos derivados de estos sistemas beneficia tanto a los productores como a los ecosistemas, promoviendo un modelo más equilibrado y resiliente.





Referencias

- Adamczyk, K., Górecka-Bruzda, A., Nowicki, J., Gumułka, M., Molik, E., Schwarz, T., Earley, B., & Kłoczek, C. (2015). Perception of environment in farm animals – A review. *Annals of Animal Science*, 15(3), 565–589. <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0031>
- (AHAW), E. P. on A. H. and A. W., Nielsen, S. S., Alvarez, J., Bicout, D. J., Calistri, P., Canali, E., Drewe, J. A., Garin-Bastuji, B., Gonzales Rojas, J. L., & Gortazar Schmidt, C. (2023). Welfare of calves. *Efsa Journal*, 21(3), e07896.
- Améndola, L., Solorio, F. J., Ku-Vera, J. C., Améndola-Massioti, R. D., Zarza, H., & Galindo, F. (2016). Social behaviour of cattle in tropical silvopastoral and monoculture systems. *Animal*, 10(5), 863–867. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002475>
- Appleby, M., Olsson, A., & Galindo, F. (2018). *Animal Welfare* (3°). CABI.
- AWIN. (2015). AWIN welfare assessment protocol for sheep.
- Blanco-Penedo, I., Cantalapiedra, J., & Llonch, P. (2020). Impacto del cambio climático sobre el bienestar animal en los sistemas ganaderos. *Informacion Tecnica Económica Agraria*. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.028>
- Broom, D. (2014). *Sentience and animal welfare*. Cabi.
- Broom, D. (2024). Bienestar Animal. In F. Galindo, A. Orihuela, & R. Ungerfeld (Eds.), *Etología aplicada: Fundamento científico del comportamiento y bienestar animal* (pp. 55–84). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Broom, D., Galindo, F., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1771), 20132025. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>
- Chamorro, M. F., Cernicchiaro, N., & Haines, D. M. (2017). Evaluation of the effects of colostrum replacer supplementation of the milk replacer ration on the occurrence of disease, antibiotic therapy, and performance of pre-weaned dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 100(2), 1378–1387. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11652>
- Cortés Fernández de Arcipreste, N., Mancera, K. F., Miguel-Pacheco, G. G., & Galindo, F. (2018). Plasticity and consistency of lying and ruminating behaviours of heifers exposed to different cubicle availability: A glance at individuality. *Applied Animal Behaviour Science*, 205, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.05.020>
- De Paula Vieira, A., Guesdon, V., de Passillé, A. M., von Keyserlingk, M. A. G., & Weary, D. M. (2008). Behavioural indicators of hunger in dairy calves. *Applied Animal Behaviour Science*, 109(2–4), 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2007.03.006>
- FAO. (2025). One Health. <https://www.fao.org/one-health/en>
- Fischer-Tenhagen, C., Meier, J., & Pohl, A. (2022). “Do not look at me like that”: Is the facial expression score reliable and accurate to evaluate pain in large domestic animals? A systematic review. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1002681. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1002681>
- Flores-Coello, G., Hernández-Medrano, J. H., Ku-Vera, J., Diaz, D., Solorio-Sánchez, F. J., Sarabia-Salgado, L., & Galindo, F. (2023). Intensive Silvopastoral Systems Mitigate Enteric Methane Emissions from Cattle. *Atmosphere*, 14(5), 863. <https://doi.org/10.3390/atmos14050863>
- Galindo, F., & Broom, D. (1993). The occurrence of lameness in relation to individual behavioural responses in dairy cows.
- Galindo, F., & Broom, D. (2000). The relationships between social behavior of dairy cows and the occurrence of lameness in three herds. *Research in Veterinary Science*, 69(1), 75–79. <https://doi.org/10.1053/rvsc.2000.0391>
- Galindo, F., Marchant, J. N., & Tadich, T. (2024a). The science of animal welfare in the One Health–One Welfare agenda: local solutions for global challenges. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 129–140.
- Galindo Maldonado, F., Orihuela Trujillo, A., & Ungerfeld Morón, R. (2024b). *Etología aplicada: fundamento científico del comportamiento y bienestar animal*. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- Garvey, M. (2022). Lameness in Dairy Cow Herds: Disease Aetiology, Prevention and Management. *Dairy*, 3(1), 199–210. <https://doi.org/10.3390/dairy3010016>
- Grandin, T. (2000). Behavioural principles of handling cattle and other grazing animals under extensive conditions.
- Hayes, B. J., Lewin, H. A., & Goddard, M. E. (2013). The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in Genetics*, 29(4), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2012.11.009>
- Hernández-Hernández, N., Martínez-González, J. C., Parra-Bracamonte, G. M., & Cienfuegos-Rivas, E. G. (2016). Importance of the genotype x environment interaction in production traits in dairy cattle. *CienciaUAT*, 10(2), 72–78.
- Hillmann, E., Bruckmaier, R., & Buchli, C. (2019). Animal lives worth living: Proceedings of the 53rd Congress of the International Society for Applied Ethology (R. C. Newberry & B. O. Braastad, Eds.). Wageningen Academic Publishers.
- Hudson, C., Whay, H., & Huxley, J. (2008). Recognition and management of pain in cattle. In *Practice*, 30(3), 126–134. <https://doi.org/10.1136/inpract.30.3.126>
- Hyland, J. J., Regan, Á., Sweeney, S., McKernan, C., Benson, T., & Dean, M. (2022). Consumers attitudes toward animal welfare friendly produce: An island of Ireland study. *Frontiers in Animal Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.930930>
- Jensen, M. B. (2011). The early behaviour of cow and calf in an individual calving pen. *Applied Animal Behaviour Science*, 134(3–4), 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2011.06.017>
- Jensen, M. B. (2018). The role of social behavior in cattle welfare. In *Advances in cattle welfare* (pp. 123–155). Elsevier.
- Llonch, P., Haskell, M. J., Dewhurst, R. J., & Turner, S. P. (2017). Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: an animal welfare perspective. *Animal*, 11(2), 274–284. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001440>
- Llonch, P., Lawrence, A. B., Haskell, M. J., Blanco-Penedo, I., & Turner, S. P. (2015). The need for a quantitative assessment of animal welfare trade-offs in climate change mitigation scenarios. *Advances in Animal Biosciences*, 6(1), 9–11. <https://doi.org/10.1017/S2040470014000405>
- Llonch, P., Somarriba, M., Duthie, C.-A., Haskell, M. J., Rooke, J. A., Troy, S., Roehe, R., & Turner, S. P. (2016). Association of Temperament and Acute Stress Responsiveness with Productivity, Feed Efficiency, and Methane Emissions in Beef Cattle: An Observational Study. *Frontiers in Veterinary Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00043>
- Mancera, K. F., Zarza, H., de Buen, L. L., García, A. A. C., Palacios, F. M., & Galindo, F. (2018). Integrating links between tree coverage and cattle welfare in silvopastoral systems evaluation. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 19. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0497-3>
- Mellor, D. J. (2016). Moving beyond the “Five Freedoms” by Updating the “Five Provisions” and Introducing Aligned “Animal Welfare Aims.” *Animals*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/ani6100059>
- Mellor, D. J., Beausoleil, N. J., Littlewood, K. E., McLean, A. N., McGreevy, P.

- D., Jones, B., & Wilkins, C. (2020). The 2020 Five Domains Model: Including Human-Animal Interactions in Assessments of Animal Welfare. *Animals*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/ani10101870>
- Miranda-de la Lama, G. C., Estévez-Moreno, L. X., Sepúlveda, W. S., Estrada-Chavero, M. C., Rayas-Amor, A. A., Villarroel, M., & María, G. A. (2017). Mexican consumers' perceptions and attitudes towards farm animal welfare and willingness to pay for welfare friendly meat products. *Meat Science*, 125, 106–113. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2016.12.001>
- Murgueitio, E., Barahona, R., Chará, J. D., Flores, M. X., Mauricio, R. M., & Molina, J. J. (2015). The intensive silvopastoral systems in Latin America sustainable alternative to face climatic change in animal husbandry. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4).
- Naranjo, A. G., Benjamín Ordóñez Díaz, J. A., Munguía Bárcenas, A., Julieta, N., Mancera, V., Enrique, L., Treviño, O., De Jesús Ordóñez Díaz, M., & Mx, A. C. (2021). Estimated Greenhouse Gas Emissions from Livestock in Mexico.
- Nielsen, S. S., Alvarez, J., Bicout, D. J., Calistri, P., Canali, E., Drewe, J. A., Garin-Bastuji, B., Gonzales Rojas, J. L., Gortázar Schmidt, C., Herskin, M., Michel, V., Miranda Chueca, M. Á., Padalino, B., Roberts, H. C., Spoolder, H., Stahl, K., Velarde, A., Viltrop, A., De Boyer des Roches, A., ... Winckler, C. (2023). Welfare of dairy cows. *EFSA Journal*, 21(5). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7993>
- Niloofer, P., Francis, D. P., Lazarova-Molnar, S., Vulpe, A., Vochin, M.-C., Suciu, G., Balanescu, M., Anestis, V., & Bartzanas, T. (2021). Data-driven decision support in livestock farming for improved animal health, welfare and greenhouse gas emissions: Overview and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106406>
- OMSA. (2024). Código Sanitario para los Animales Terrestres. <https://www.woah.org/es/que-hacemos/normas/codigos-y-manuales/acceso-en-linea-al-codigo-terrestre/>
- ONU. (2025). Goal 2: End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture. Sustainable Development Goal Indicators. <https://unstats.un.org/sdgs/>
- Pérez-Lombardini, F., Mancera, K. F., Suzán, G., Campo, J., Solorio, J., & Galindo, F. (2021). Assessing Sustainability in Cattle Silvopastoral Systems in the Mexican Tropics Using the SAFA Framework. *Animals*, 11(1), 109. <https://doi.org/10.3390/ani11010109>
- Peters, M. D. P., Silveira, I. D. B., & Fischer, V. (2015). Impact of subclinical and clinical mastitis on sensitivity to pain of dairy cows. *Animal*, 9(12), 2024–2028. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001391>
- Pulina, G., Lunesu, M. F., Pirlo, G., Ellies-Oury, M.-P., Chriki, S., & Hocquette, J.-F. (2022). Sustainable production and consumption of animal products. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 30, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100404>
- Renaud, D. L., Duffield, T. F., LeBlanc, S. J., Ferguson, S., Haley, D. B., & Kelton, D. F. (2018). Risk factors associated with mortality at a milk-fed veal calf facility: A prospective cohort study. *Journal of Dairy Science*, 101(3), 2659–2668. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13581>
- Roche, B., Garchitorena, A., Guégan, J., Arnal, A., Roiz, D., Morand, S., Zambrana-Torrel, C., Suzán, G., & Daszak, P. (2020). Was the COVID-19 pandemic avoidable? A call for a “solution-oriented” approach in pathogen evolutionary ecology to prevent future outbreaks. *Ecology Letters*, 23(11), 1557–1560.
- Rowbotham, R. F., & Ruegg, P. L. (2016). Associations of selected bedding types with incidence rates of subclinical and clinical mastitis in primiparous Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(6), 4707–4717. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10675>
- Schwanke, A. J., Neave, H. W., Penner, G. B., Bergeron, R., & DeVries, T. J. (2024). Flexible feeding: Dairy cow personality affects changes in feeding behavior and milk production under feed competition conditions. *Journal of Dairy Science*, 107(4), 2465–2482. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24063>
- Silva - Cassani, N., Mancera, K. F., Canul, J., Ramirez Aviles, L., Solorio, J., Güereca, P., & Galindo, F. (2022). Evaluation of the sustainable performance of native and intensive silvopastoral systems in the Mexican tropics using the mesmis framework. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(3). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3556>
- SNMF-CONAFOR. (2025). ¿Qué es la deforestación? Deforestación. <https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>
- Steagall, P. V., Bustamante, H., Johnson, C. B., & Turner, P. V. (2021). Pain Management in Farm Animals: Focus on Cattle, Sheep and Pigs. *Animals*, 11(6), 1483. <https://doi.org/10.3390/ani11061483>
- Temple, D., Bargo, F., Mainau, E., Ipharraguerre, I., & Manteca, X. (2016). Conducta de descanso y eficiencia productiva de las vacas de leche-una visión práctica. *Ficha Técnica Sobre Bienestar de Animales de Granja. FAWEC*, 15.
- Temple, D., & Manteca, X. (2020). Animal Welfare in Extensive Production Systems Is Still an Area of Concern. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.545902>
- Trevisi, E., & Bertoni, G. (2009). Some physiological and biochemical methods for acute and chronic stress evaluation in dairy cows. *Italian Journal of Animal Science*, 8(sup1), 265–286. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s1.265>
- Tucker, C. B., Jensen, M. B., de Passillé, A. M., Hänninen, L., & Rushen, J. (2021). Invited review: Lying time and the welfare of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104(1), 20–46. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18074>
- Van Oudenhoven, A. P. E., Petz, K., Alkemade, R., Hein, L., & De Groot, R. S. (2012). Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.012>
- von Keyserlingk, M. A. G., Martin, N. P., Kebreab, E., Knowlton, K. F., Grant, R. J., Stephenson, M., Sniffen, C. J., Harner, J. P., Wright, A. D., & Smith, S. I. (2013). Invited review: Sustainability of the US dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 96(9), 5405–5425. <https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2012-6354>
- von Keyserlingk, M. A. G., Rushen, J., de Passillé, A. M., & Weary, D. M. (2009). Invited review: The welfare of dairy cattle—Key concepts and the role of science. *Journal of Dairy Science*, 92(9), 4101–4111. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2326>
- Weary, D. M., & Tucker, C. (2003). The science of cow comfort. *Proceedings of the Joint Meeting Of the Ontario Agri Business Association and the Ontario Association of Bovine Practitioners*, Guelph, Ont.
- Welfare Quality Network. (2023). Welfare Quality assessment protocol for cattle. In *Welfare Quality assessment protocol for cattle: Vol. Version 3.0*. Welfare Quality Network.
- Whittaker, A. L., Muns, R., Wang, D., Martínez-Burnes, J., Hernández-Ávalos, I., Casas-Alvarado, A., Domínguez-Oliva, A., & Mota-Rojas, D. (2023). Assessment of Pain and Inflammation in Domestic Animals Using Infrared Thermography: A Narrative Review. *Animals*, 13(13), 2065. <https://doi.org/10.3390/ani13132065>
- Zoltick, A. H., Mann, S., & Coetzee, J. F. (2024). Pain pathophysiology and pharmacology of cattle: how improved understanding can enhance pain prevention, mitigation, and welfare. *Frontiers in Pain Research*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpain.2024.1396992>

8

EL MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE CH₄

Felipe de Jesús Ruiz López¹
Areli Daniela González Sandoval²
Adriana García Ruiz¹

¹Centro Nacional de Investigación en Fisiología
y Mejoramiento Animal, INIFAP

²Consultora Privada



Las ganancias obtenidas por mejoramiento genético son permanentes y aditivas

Introducción

La ganadería contribuye con un importante porcentaje de las emisiones antropogénicas de metano (CH_4). Estas emisiones provienen principalmente de la fermentación entérica en el rumen de los rumiantes (80%) y de la gestión de excretas (20%) (Bačėninaitė *et al.*, 2022; Garnsworthy *et al.*, 2019). Durante la fermentación entérica, los microorganismos descomponen la celulosa y otros carbohidratos complejos, produciendo ácidos grasos volátiles que el animal utiliza como fuente de energía, además de gases como CO_2 y CH_4 . Se estima que una vaca puede producir aproximadamente 280 litros de CH_4 por día y existen varias formas de disminuir esta cantidad.

Con el creciente interés por la sostenibilidad ambiental y la necesidad de seguir produciendo proteína de origen animal, reducir la producción de CH_4 del ganado lechero se ha convertido en una prioridad. La selección genética es un enfoque altamente prometedor para lograr este objetivo ya que, sin comprometer la productividad, puede modificar varias características que contribuyan a la disminución de las emisiones de CH_4 al mismo tiempo. Además, las ganancias obtenidas por mejoramiento genético son permanentes y aditivas, es decir, se pueden ir mejorando generación con generación si los objetivos de selección se mantienen a través del tiempo.

Emisiones de CH_4 en el ganado lechero

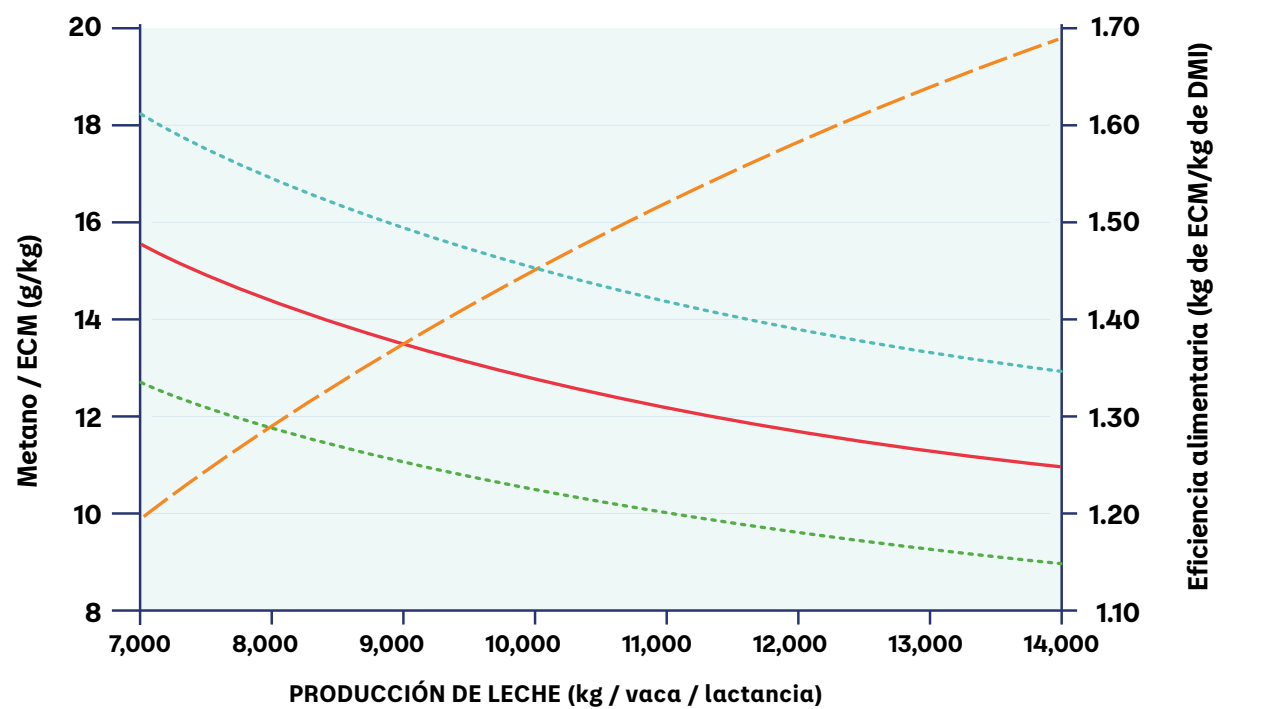
En la fermentación entérica del rumen, es donde los microorganismos de éste descomponen los alimentos

y liberan CH_4 como subproducto. La magnitud de estas emisiones varía en función de factores como la composición del alimento, la eficiencia digestiva y las características genéticas individuales. Tradicionalmente, los esfuerzos para mitigar las emisiones de CH_4 se han centrado en cambios en la alimentación; sin embargo, las soluciones a largo plazo requieren mejoramiento genético para criar vacas intrínsecamente bajas en emisiones. Se ha demostrado que hasta 12% de la energía bruta consumida por un animal se pierde como CH_4 , afectando la eficiencia y la productividad, lo que implica que al mejorar la eficiencia se disminuirá la producción de CH_4 (figura 1; Blaxter y Clapperton, 1965; Knapp *et al.*, 2014). Se estima que los cambios en la alimentación pueden lograr hasta 70% en la reducción de las emisiones de CH_4 , dependiendo del método o la naturaleza de la intervención nutricional; sin embargo, estos cambios no son permanentes (Tseten *et al.*, 2022).

Base genética de las emisiones de CH_4

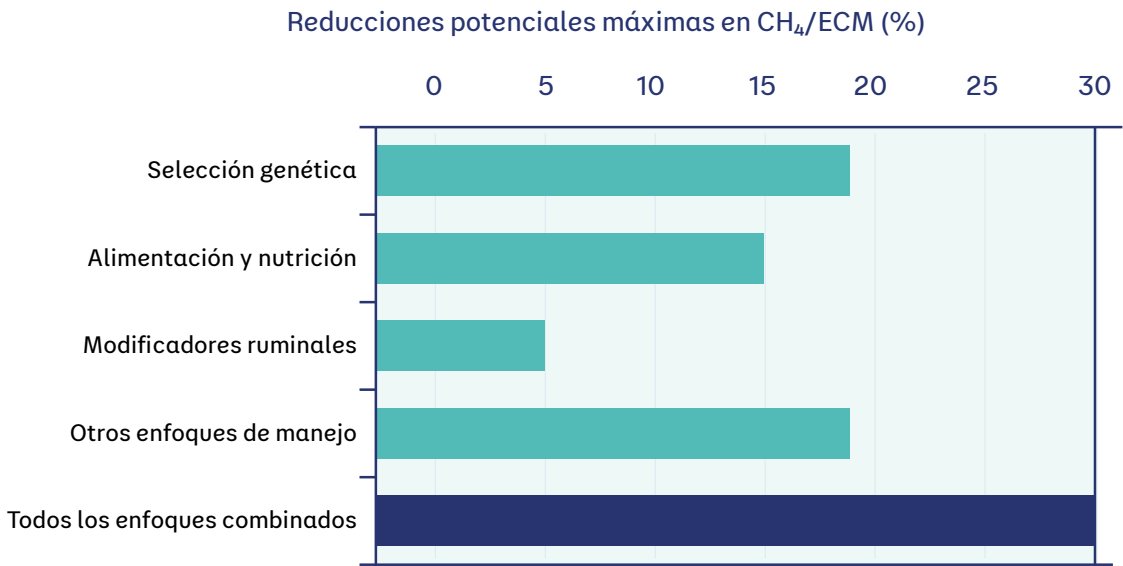
Cuando se identificó que existía variación entre animales para la eficiencia en la utilización de nutrientes –medida en un inicio como consumo residual–, también se observó que animales con consumos residuales más bajos también producían menos CH_4 entérico (Hegarty, 2007) lo que no sólo corroboraba la idea de la relación entre la producción de CH_4 y la eficiencia, sino que abría la puerta para la disminución de la primera indirectamente al mejorar la segunda.

Figura 1. Emisiones de CH₄ entérico por unidad de leche corregida por energía (ECM) y eficiencia de alimentación por nivel de producción



Fuente: Tomado de Knapp et al. 2014.

Figura 2. Impacto esperado de varias alternativas para disminuir la emisión de CH₄



Fuente: Tomado de Knapp et al. 2014.

Hasta 12 % de la energía bruta consumida por un animal se pierde como CH₄, afectando eficiencia y productividad

Existe un consenso general de que el incremento de la productividad podrá reducir las emisiones de CH₄ a nivel global, ya que por un lado la emisión de CH₄ por kg de leche es menor en una vaca alta productora, y por el otro, si se puede producir la misma cantidad de leche con menos vacas, la producción global de CH₄ también se reducirá. Como la producción de CH₄ es proporcional a la energía consumida por el animal, la reducción de la proporción utilizada para el mantenimiento sin afectar o mejorando la producción láctea resultará en reducciones de la producción de CH₄ por litro de leche producido, haciendo del mejoramiento la alternativa más atractiva para disminuir las emisiones de CH₄ (figura 2; Knapp *et al.* 2014). El mejoramiento genético de la productividad en el ganado lechero ha sido exitoso desde hace mucho tiempo, alcanzando tasas de mejoramiento de hasta 100 kg de leche por año por vaca (CDCB, 2025), aunque en México y otros países sólo se alcance una fracción de ésta por efectos ambientales y falta de programas nacionales de mejoramiento genético.

Cuando se mejoraron los sistemas de medición de CH₄ y se incrementaron los números de animales medidos, se logró comprobar que existe variabilidad genética entre las vacas lecheras en cuanto a la producción de CH₄, lo que sugiere la posibilidad de una selección genética eficaz, aunque no haya sido sino hasta la incorporación de la información genómica a las evaluaciones, cuando la idea tomó su verdadera importancia.

Diversos rasgos heredables influyen en las emisiones de CH₄, incluyendo, entre otros, la eficiencia alimenticia, la composición de la microbiota ruminal y los procesos digestivos, lo que ha permitido pensar en rutas indirectas para disminuir genéticamente la producción de CH₄ entérico. Estudios han demostrado que las vacas con bajas emisiones de CH₄ presentan perfiles microbianos distintos, enfatizando el componente genético de la producción de CH₄, tanto a nivel animal como a nivel microbiano (Wallace *et al.*, 2019).

Por otro lado, al ser el CH₄ un producto de la fermentación entérica, los cambios en las condiciones físicas y fisiológicas del rumen pueden afectar la composición de la microbiota ruminal y promover el crecimiento de microbios específicos. Esto hace que se pueda afectar la emisión de CH₄ a través de selección (González-Recio *et al.*, 2018).

De forma paralela, la selección de vacas más eficientes incluye aspectos como la fertilidad, la calidad de la leche, la resistencia a enfermedades y la tolerancia al calor, aspectos todos que permitirán a la vaca producir más leche, por más tiempo y visto de forma general, contribuye a disminuir de manera importante el número de vacas requerido para producir la misma cantidad de leche, disminuyendo con esto la producción de CH₄ y otros contaminantes de la actividad. Capper *et al.* (2009) mencionaron que sólo en Estados Unidos, de 1944 a 2007, el inventario ganadero lechero disminuyó aproximadamente 60%, la producción total se incrementó 59% y las emisiones calculadas de CH₄ se redujeron.

Otra vía indirecta ha sido la reducción del tamaño de la vaca. Desde hace varios años, las características relacionadas con el tamaño de la vaca (estatura o peso) han tenido ponderaciones negativas en los índices de selección, resultando en vacas más pequeñas pero sin sacrificar los niveles de producción, lo que a la vez lleva a vacas más eficientes al tener requerimientos menores para mantenimiento.

Heredabilidad de las emisiones de CH₄

Las estimaciones de heredabilidad para las emisiones de CH₄ varían entre 0.16 y 0.40, lo que indica que es un rasgo moderadamente heredable y de múltiples orígenes (Pickering *et al.*, 2015), dependiendo de la forma en que se mide y expresa la característica. Este nivel de heredabilidad sugiere que la selección puede generar mejoras significativas a lo largo de las generaciones. Es esencial considerar las correlaciones genéticas con rasgos de

La selección de vacas con menor consumo de alimento residual y mayor eficiencia alimenticia repercute en generaciones futuras con menor producción de CH₄

producción, como el rendimiento lechero y la eficiencia alimenticia para evitar compensaciones negativas (de Haas *et al.*, 2011). Cuando la característica se expresa como producción de CH₄ (medida en gr/día), la heredabilidad se ha calculado en 0.16, mientras que cuando se expresa como rendimiento (medida en g/kg de materia seca ingerida) o como intensidad (medida como g/kg de leche producido), la heredabilidad calculada tiene a ser mayor, 0.27 y 0.21 respectivamente (Kalamanathan *et al.*, 2023).

Estos tres tipos de medición se encuentran correlacionados positivamente, variando entre 0.68 (rendimiento con intensidad) y 0.94 (producción e intensidad). Otra escala utilizada es la concentración de CH₄ (medida en ppm; Van Breukelen *et al.*, 2024) y su heredabilidad se encuentra en la parte baja (0.17), comparada a las reportadas en otras escalas. La heredabilidad no difiere entre métodos de medición para las mediciones hechas con cámaras (greenfeed) o con aspiradores (*sniffers*) (Van Breukelen *et al.* 2023).

En el caso particular del control genético de la microbiota involucrada con la producción de CH₄, se han reportado diferencias entre razas y sementales (Roehe *et al.*, 2016) y calculado heredabilidades entre 0.13 y 0.61 para el conjunto de microbios involucrados con la producción de CH₄ (González-Recio *et al.*, 2018).

Selección para reducir las emisiones de CH₄. Métodos de selección indirecta

Aunque como se mencionó anteriormente, la información sobre la emisión de CH₄ individual en los establos no está disponible de manera generalizada, la relación que esta variable guarda con otras variables de medición rutinaria en el establo hace de la selección indirecta basada en rasgos correlacionados una alternativa práctica. Algunos indicadores prometedores incluyen:

Eficiencia alimenticia: seleccionar vacas con menor consumo de alimento residual (RFI) y mayor eficiencia

alimenticia ayuda a reducir las emisiones de CH₄ porque estas vacas convierten el alimento en peso corporal o leche de manera más eficiente, lo que significa que requieren menos alimento para mantener la productividad (de Haas *et al.*, 2011). Aunque las razones son múltiples, algunas de ellas son:

1. Menor consumo de alimento = menos fermentación.

Las vacas con menor RFI consumen menos alimento y mantienen el rendimiento. Dado que el CH₄ es un subproducto de la fermentación microbiana en el rumen, la reducción del consumo de alimento disminuye la fermentación y, en consecuencia, la producción de CH₄.

2. Eficiencia digestiva mejorada. Las vacas más eficientes extraen más energía de su alimento, lo que significa que menos material no digerido ingresa al rumen para que los microbios lo fermenten, hasta convertirlo en CH₄.

3. Reducción de desperdicio de energía. Las vacas con alta eficiencia alimenticia dirigen más energía hacia el crecimiento o la producción de leche en lugar de liberarla en forma de CH₄ o calor.

4. Reducción de la producción de estiércol. Una utilización más eficiente del alimento da como resultado menos material no digerido en el estiércol, lo que reduce las emisiones de CH₄ provenientes de la descomposición del estiércol.

5. Beneficios genéticos y a largo plazo. Al criar selectivamente vacas con un RFI más bajo, las generaciones futuras producirán naturalmente menos CH₄, lo que contribuirá a una ganadería más sostenible. Aunque la base fisiológica del RFI está bien fundamentada, existen problemas en su implementación, no sólo por lo complicado que es su medición directa, sino por su alta correlación con consumo de materia seca y peso corporal que cambian mucho durante la lactación

temprana (Coleman *et al.*, 2010). El impacto de la selección para disminuir RFI sobre la emisión de CH₄ es bajo porque la heredabilidad de RFI tiende a ser menor de 15%, lo que sitúa al impacto potencial sobre CH₄ por litro de leche a menos de 5% (Knapp *et al.* 2014).

Perfil de ácidos grasos en la leche: estos ácidos y la producción de CH₄ en las vacas lecheras están estrechamente relacionados con su dieta, la fermentación ruminal y la actividad microbiana a través de diferentes mecanismos, entre los que se encuentran:

1. Fermentación ruminal y producción de CH₄. Las vacas lecheras producen CH₄ como subproducto de la fermentación entérica, un proceso en el que los microbios del rumen descomponen el alimento. Las arqueas metanogénicas utilizan hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂) para formar CH₄, que luego se expulsa mediante eructos. Las dietas ricas en fibra promueven la producción de acetato en el rumen, lo que incrementa la producción de CH₄, mientras que las dietas ricas en almidón promueven la producción de propionato, lo que reduce la formación de CH₄.

2. Perfil de ácidos grasos de la leche como indicador de la producción de CH₄. Éstos son:

Ácidos grasos de novo (C4:0 a C14:0): sintetizados en la glándula mamaria y asociados con una alta producción de acetato, lo que se correlaciona con mayores emisiones de CH₄.

Ácidos grasos preformados (C16:0 y más): derivados de grasas dietéticas o de la movilización de grasa corporal. Los niveles altos están asociados con proporciones más bajas de acetato a propionato y una producción reducida de CH₄.

Ácidos grasos de cadena impar y ramificada (OBCFA): producidos por bacterias del rumen y sirven como biomarcadores de la actividad microbiana y los patrones de fermentación.

Composición de la microbiota ruminal: algunas poblaciones microbianas están vinculadas a menores emisiones de CH₄, lo que hace del perfil de la microbiota una herramienta potencial de selección (Roehe *et al.*, 2016). La microbiota ruminal es una comunidad compleja y diversa de microorganismos que habita en el rumen. Estos microorganismos desempeñan un papel esencial en la digestión de alimentos ricos en celulosa y otros

carbohidratos complejos que los animales no pueden descomponer por sí mismos. La microbiota ruminal incluye bacterias, protozoos, arqueas metanogénicas, hongos y virus. Se estima que existen más de 2,000 especies distintas de microorganismos en el rumen, aunque la mayoría aún no han sido cultivadas ni caracterizadas completamente.

Estrategias de mejoramiento para ganado lechero para bajas emisiones de CH₄. Métodos de selección tradicionales

Los programas de mejora genética convencionales pueden incorporar rasgos relacionados con el CH₄ en los índices de selección de forma permanente y acumulativa. Al combinar estos rasgos con objetivos existentes, como la producción de leche y la fertilidad, es posible lograr avances genéticos sin comprometer la productividad (Wall *et al.*, 2010). Se ha demostrado que al seleccionar animales con mayor producción (incluyendo kg de grasa y de proteína), el resultado ha sido animales con menor producción de CH₄ por kg de leche corregida por energía (LCE), disminuyendo la producción entérica y de heces hasta en 2.7 y 0.3 g/kg LCE, respectivamente (Bell *et al.*, 2011). Aunado a lo anterior, los mismos autores reportaron disminuciones en la producción de CH₄ conforme la vaca iba madurando (18.3 vs 16 g/kg LCE en vacas de 1 o de más de tres partos, respectivamente).

La selección a favor de la producción de proteína en las últimas décadas ha resultado en incrementos importantes en la producción individual del ganado y en una reducción esperada del CH₄ emitido dependiente del nivel de producción, variando del 7.3% para vacas de lactaciones de 7,000 kg hasta el 1.3% para vacas produciendo 13,000 kg o más (Knapp *et al.*, 2014). Por otra parte, la inclusión de resistencia a enfermedades también ha contribuido a la disminución de las emisiones de CH₄ ya que, aunque tienen bajas heredabilidades de $h^2 = .05$ a 0.25 (Uribe *et al.*, 1995; Zwald *et al.*, 2004), están asociadas positivamente con la producción láctea y con la supervivencia del animal. La selección para resistencia al calor podría también impactar la producción de CH₄ porque la correlación negativa entre la resistencia y la producción de leche y sus componentes, podría incrementar la producción de CH₄ (Ravagnolo y Miztal, 2000).

Son varios los países involucrados en los esfuerzos para establecer los procesos de selección que permitan la reducción de CH₄. La recolección de emisiones de CH₄

por animal y la generación de información genómica son procesos caros y/o difíciles de hacer en escalas grandes, por lo que la integración de grupos internacionales es la única manera de lograr este objetivo. Sin embargo, ésta tampoco es una tarea fácil, ya que no existe un consenso en la mejor manera de establecer el objetivo de selección (de Hass *et al.*, 2017). Aún así, se han estudiado más de 15 características relacionadas con la producción y eficiencia de emisiones de CH₄, encontrándose heredabilidades de entre 0.06 para consumo residual y 0.38 para intensidad de CH₄, utilizando la información de cuatro países al mismo tiempo. Las correlaciones genéticas entre características de CH₄ y producción de leche fueron positivas y moderadas (Manzanilla-Pech *et al.*, 2020).

Si bien el desarrollo de índices para mejorar varias características al mismo tiempo es un enfoque útil, antes de elegir las características a incluir se deben revisar las correlaciones genéticas entre ellas para que no haya duplicidad y con esto se pierda eficiencia en el proceso de selección. En el caso de emisiones de CH₄, se ha recomendado que sea producción de CH₄ ajustada por el peso metabólico del animal y la producción de LCE, considerando la muy baja correlación de CH₄ con consumo de materia seca y su correlación positiva con RFI (Manzanilla-Pech *et al.*, 2020).

En resumen, la selección para incrementar la producción láctea, la fertilidad, RFI, la resistencia a enfermedades y la tolerancia al calor resultarán en reducciones en las emisiones de CH₄ entérico por litro de leche a través de un incremento en la producción de leche, dilución de los costos de alimentación de mantenimiento y la reducción del número de reemplazos necesarios (menos animales en el sistema); lo anterior aunque la dificultad para obtener las mediciones de algunas de las variables (RFI, por ejemplo) aún debe ser resuelto (Knapp *et al.*, 2014).

Selección genómica aplicada a la disminución de CH₄

La selección genómica consiste en ligar mutaciones genéticas (del tipo de polimorfismo de un solo nucleótido) a las características de interés, que en nuestro caso son los valores genéticos (Goddard, 2012); es decir, utilizar la información genética obtenida del ADN de los animales para predecir su valor genético y tomar decisiones para la selección. Medir directamente las emisiones de CH₄ es

un desafío, pero se puede lograr mediante métodos como cámaras de respiración, detectores de CH₄ por láser o sistemas GreenFeed. La selección directa requiere esfuerzos a gran escala en fenotipado¹ para garantizar evaluaciones genéticas precisas (Lassen & Løvendahl, 2016).

Desde el punto de vista poblacional no hace mucha lógica el establecer métodos de medición directa de emisiones de CH₄ en las instalaciones comerciales ganaderas, ya que hasta el momento no se ha encontrado un uso de esta información en la toma de decisiones del ganadero. Sin embargo, es muy importante para la industria que, de forma global, le es muy importante que las emisiones se reduzcan y la contribución de la genética para dicho fin.

La naturaleza poligénica de las características complejas con bajas heredabilidades, como lo es la producción de CH₄ entérico, hacen que el mejoramiento genético tradicional sea lento, y si a esto agregamos el hecho de que la medición de la producción de CH₄ es cara y/o complicada bajo condiciones de producción, la selección directa sobre la característica es poco factible con esquemas cuantitativos tradicionales. Por lo anterior, el enfoque de genes candidatos o genes mayores no ha dado los resultados esperados y son pocos los loci de caracteres cuantitativos asociados a la producción de CH₄ listados en los sitios de almacenamiento como el QTLdb y otras. Sin embargo, los avances en tecnologías genómicas han hecho posible la selección de estos caracteres. El empleo de información genómica en los procesos de estimación del potencial genético de un animal ha abierto la posibilidad no sólo de seleccionar animales de manera más precisa al conocer mejor la información contenida en su ADN, sino que además ha permitido:

- a) Seleccionar a los animales a edades más tempranas disminuyendo el intervalo entre partos e incrementando la ganancia genética por año.
- b) Mejorar características de baja heredabilidad.
- c) Mejorar características difíciles o caras de medir al poder extender los beneficios a cualquier animal genotipado, cuente o no con medición o con parientes con medición de la característica a mejorar.

Por lo anterior, al utilizar a la selección genómica basada en marcadores de ADN para predecir el mérito genético de un animal para la disminución de CH₄, se puede vislumbrar

¹ Refiere las características observables en el animal, resultado de su genotipo (su información genética) en interacción con su medio ambiente.

La selección para incrementar la producción láctea, la fertilidad, menor consumo de alimento residual, la resistencia a enfermedades y la tolerancia al calor resultarán en reducciones en las emisiones de CH₄ entérico por litro de leche a través de un incremento en la producción de leche, dilución de los costos de alimentación de mantenimiento y la reducción del número de remplazos necesarios: menos animales en el sistema



Cuadro 1. Genes candidatos y SNPs en regiones significativas relacionadas a varias características asociadas a la emisión de metano en ganado productor de leche. (Tomado de Worku, 2024)

ch	Genes candidatos/ SNPs	Posición (bp)	tipo de estudio	Características asociadas	Raza	Número de animales genotipados	País
1	ARS-BFgl-ngS-93180	138,832,098	gWAS	Rmetc, mey	hF	1962	Dinamarca
4	4: 115,131,249	115,131,249	gWAS	Pme	hF	150	Irán
	ARS-BFgl-ngS-24888	3,583,133	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	hapmap59221- rs29014908	35,939,871		meic, meip			
	hapmap44201- BtA-114510	36,842,170		meic, meip			
	CYP51A1	9,306,414- 9,323,252	gWAS	meP	hF	287	Polonia
5	5: 16,795,260	16,795,260	gWAS	Ácido valérico	hF	150	Irán
6	hapmap51046- BtA-75812	61,984,747	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	hapmap52436- rs29009653	99,732,094		meic, meip			
11	ARS-BFgl-ngS-47330	44,562,022	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	ARS-BFgl-ngS-12929	64,313,748		mec, meP			
	hapmap26463- BtA-159947	92,086,008		mec, meP			
13	13: 81,673,732	81,673,732	gWAS	Pme	hF	150	Irán
	hapmap49571- BtA-32781	47,583,553	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	BtB-00525367	47,915,618		mec, meP			
	ARS-BFgl-ngS-70206	48,622,655		mec, meP			
	BtA-115847-no-rs	48,826,815		mec, meP			
	PPP1R16B	68,258,627- 68,366,080	gWAS	meP	hF	287	Polonia
	SLC23A2	47,642,260	gWAS	meP	Bos taurus, Bos indicus, y cruzas	280	México

ch	Genes candidatos/ SNPs	Posición (bp)	tipo de estudio	Características asociadas	Raza	Número de animales genotipados	País
14	14: 62,204,044	62,204,044	gWAS	meP	Bos taurus, Bos indicus, y cruzas	280	México
	LY6D, GML, CYHR1, PPP1R16A, ARHGAP39, ZNF7, OPLAH, MAF1, y SPATC1	1.86–2.12 mb 1.48–1.68 mb	gWAS	Pme lmi	Walloon - vacas lecheras	7381	Bélgica
	TRPS1	48,890,778, 48,858,864, 48,726,666, 48,679,326	gWAS	ch ₄ ppm /d	hF	483	Polonia
15	15: 25,797,132	25,797,132	gWAS	Pme	hF	150	Irán
	BtA-37116-no-rs	57,228,610	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
18	ARS-BFgl-ngS-32691	34,159,637	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	ARS-BFgl-ngS-54767	7,605,307		meic, meip			
19	UA-iFASA-7562	49,438,164	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	19: 24,494,923	24,494,923	gWAS	Pme	hF	150	Irán
	RAI14	47,747,001	gWAS	meP	Bos taurus, Bos indicus, y cruzas	280	México
24	ARS-BFgl-ngS-103202	61,455,723	gWAS	meyc, meyp	hF	1962	Dinamarca
25	NTHL1	1,590,252– 1,595,934	gWAS	meP	hF	287	Polonia
	TSC2	1,596,730– 1,626,967		meP			
	PKD1	1,627,978– 1,666,088		meP			
	25: 37,967,076	37,967,076	gWAS	Ácido valérico	hF	150	Irán
26	hapmap33073- BtA-162864	21,180,893	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	ARS-BFgl-ngS-2180	24,477,962		mec, meP			
	ARS-BFgl-ngS-1092	24,531,763		mec, meP			
	ARS-BFgl-ngS-18194	24,575,207		mec, meP			
	ARS-BFgl-ngS-81009	26,491,674		mec, meP			

ch	Genes candidatos/ SNPs	Posición (bp)	tipo de estudio	Características asociadas	Raza	Número de animales genotipados	País
	hapmap38478- BtA-20824	28,723,721		mec, meP			
	hapmap40449- BtA-61103	31,213,256		mec, meP			
27	hapmap19519- rs29022379	19,017,466	gWAS	meip, meyc	hF	1962	Dinamarca
28	28: 21,771,233	21,771,233	gWAS	Pme	hF	150	Irán
	ARS-BFgl-ngS-60192	25,609,489	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
29	ARS-BFgl-ngS-24205	25,325,889	gWAS	mec, meP	hF	1962	Dinamarca
	ABS4 y DNAJC10	–	Meta- genoma	Composición de la microbiota ruminal	hF	690	Dinamarca

ch: cromosoma; Rmetc: metano residual basado en concentración de metano (mec); mey: rendimiento de metano; Pme: emisiones diarias de metano predichas; mec: concentración de metano; meP: producción de metano; meic: intensidad de metano basado en mec; meip: intensidad de metano basada en meP; lmi: transformación logarítmica de la intensidad predicha de metano.

un escenario en el que se aplique a un gran número de animales, aunque los parámetros genéticos se hayan calculado con base en un número reducido. Cuando se utiliza información genómica aunado a inseminación artificial, se puede esperar duplicar el avance genético por año con reducciones de metano de 2.6 a 5 kg/vaca/año (Worden *et al.*, 2020).

Recientemente, se ha incrementado de manera notable el número de trabajos cuyo objetivo ha sido identificar marcadores tipo SNP (polimorfismos de nucleótido único) asociados a la variación entre animales para producción de CH₄ y se han reportado marcadores en 16 de los 23 cromosomas autosómicos del bovino, es decir, que parece que la información genética asociada a las emisiones de CH₄ se encuentra distribuida en prácticamente todo el genoma bovino (cuadro 1; Worku, 2024). Sin embargo, y aunque el número de animales en los estudios es una limitante importante para la implementación de la selección genómica para disminuir las emisiones de CH₄, España y Canadá son los dos países que han implementado evaluaciones genéticas para reducir las emisiones de metano en el ganado vacuno lechero.

En los Países Bajos, de Hass *et al.* (2011) utilizaron predicción de emisión de CH₄ a partir de consumo de alimento, densidad energética de la ración y las necesidades de

energía para el mantenimiento del animal, aunado a información genómica del animal, encontrando que siete marcadores en cinco cromosomas presentaron efectos importantes y concluyendo que, suponiendo un progreso genético similar al de otras características de 0.22 desviaciones estándar genéticas por año, en 10 años se podría disminuir la producción de CH₄ en 13 kg/vaca/lactación, es decir, 1.1% anual o 2.6% anual para producción de CH₄ por kg de leche corregida por energía.

Es de esperarse que, en el futuro cercano, sean varios más los países que implementen este tipo de evaluaciones al contar con número elevado de animales genotipados. Por ejemplo, en Estados Unidos de América, la evaluación genética de ganado Holstein en 2025 contará con más de 8.5 millones de animales con información genómica para los cálculos genéticos (CDCB, USA, 2025), y de éstos casi 74 mil son de animales en México.

Recientemente, Canadá implementó un sistema de evaluación genómica que utiliza la predicción de la producción de CH₄ a partir de mediciones de infrarrojo medio de leche aunada a las de kg de leche, grasa y proteína como características correlacionadas. Los autores que utilizaron heredabilidades de 0.23 para CH₄, consideraron correlaciones negativas con producción de leche y proteína, y positivas con producción de grasa



**Parece que la información genética
asociada a las emisiones de CH₄ se
encuentra distribuida en prácticamente
todo el genoma bovino**

y reportaron disminuciones potenciales de emisión de CH₄ de 20% a 30% para el año 2050 si incluyeran esta característica dentro de sus objetivos de selección (Rojas de Oliveira *et al.*, 2024).

Edición genética y ciencias “ómicas”

Las tecnologías de edición genética como CRISPR-Cas9 ofrecen posibles vías para modificar directamente los genes asociados con la producción de CH₄, ya sea a nivel del bovino o de las arqueas metanogénicas y otros microorganismos involucrados en la producción de CH₄. Aunque aún se encuentran en etapas iniciales, la edición genética podría complementar los esfuerzos de selección tradicional en el futuro (Van Eenennaam *et al.*, 2019).

El uso de enfoques que integran datos “ómicos” es especialmente benéfico al estudiar rasgos complejos, que están influenciados por múltiples genes y características genéticas y por lo tanto pueden ser mejor explicados al estudiar el rasgo como un sistema biológico. La incorporación de las ciencias “ómicas” (metagenómica, metabolómica, transcriptómica, etcétera) a los programas de mejoramiento podrán identificar genes candidatos, regiones genómicas y rutas metabólicas asociadas a la emisión de CH₄, mejorando la respuesta esperada a la selección (Asselstine *et al.*, 2021).

Desafíos y consideraciones

A pesar de los beneficios potenciales, es necesario enfrentar varios retos para establecer un programa de mejoramiento genético para CH₄:

Limitaciones en la recopilación de datos: la medición a gran escala del CH₄ requiere inversión en infraestructura y tecnología (Lassen & Løvendahl, 2016).

Correlaciones genéticas: la selección de vacas con bajas emisiones de CH₄ no debe comprometer otros rasgos

esenciales como la producción de leche, la fertilidad y la salud (De Haas *et al.*, 2011).

Aceptación regulatoria y del consumidor: se deben considerar la percepción pública y los marcos regulatorios para la modificación genética y la selección genómica (Van Eenennaam *et al.*, 2019).

Viabilidad económica: la implementación de estrategias de reducción de CH₄ a través de la selección genética requiere análisis de costo-beneficio para garantizar su adopción por parte de los productores lecheros (Beauchemin *et al.*, 2020).

Futuras direcciones

Las futuras investigaciones deben centrarse en integrar enfoques genéticos, nutricionales y microbiológicos para optimizar la reducción del CH₄. La combinación de la selección genética con aditivos alimentarios, el manejo mejorado del hato y la ingeniería de la microbiota podría generar efectos sinérgicos. Además, los avances en inteligencia artificial y análisis de big data pueden mejorar la evaluación genética y la precisión en la selección (Berry *et al.*, 2019).

Conclusión

La selección genética para reducir las emisiones de CH₄ en el ganado lechero representa un enfoque sostenible para mitigar los impactos ambientales sin afectar la productividad. Existe variabilidad genética en la producción de CH₄ y la incorporación de este rasgo en los programas de mejoramiento mediante métodos de selección directa e indirecta es factible. Los avances en las tecnologías genómicas ofrecen un camino prometedor hacia una producción lechera de bajas emisiones. Superar desafíos relacionados con la recopilación de datos, las compensaciones genéticas y la percepción del consumidor será crucial para su implementación exitosa.

Referencias

Asselstine, V., Lam S., Miglör F., Brito L.F., Sweett H., Guan L., Waters S.M., Plastow G., and Cánovas A. (2021). The potential for mitigation of methane emissions in ruminants through the application of metagenomics, metabolomics, and other -OMICS technologies. *Journal of Animal Science*, 99(10). <https://doi.org/10.1093/jas/skab193>

Bačėninaitė, D., Džerėkaitė, K., and Antanaitis, R. (2022). Global Warming and Dairy Cattle: How to Control and Reduce Methane Emission. *Animals* (Basel). 12(19). doi: 10.3390/ani12192687.

Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., and McAllister, T. A. (2020). Mitigation of methane emissions from ruminant animals: A review of strategies. *Animal Production Science*, 60(1), 1-10.

Bell, M.J., Wall, E., Simm, G. and Russell, G. (2011). Effects of genetic line and feeding system on methane emissions from dairy systems. *Animal Feed Science and Technology*. 166-167.

Berry, D. P., Lassen, J., and de Haas, Y. (2019). Genetic selection for methane emissions in dairy cattle. *Animal*, 13(s2), 65-74.

- Blaxter, K.L., and Clapperton, J.L. (1965). Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *Brit. J. Nutr.* 19, 511-522.
- Capper J.L., Cady, R.A., and Bauman D.E. (2009). The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *J. Anim. Sci.* 87:2160-2167. doi:10.2527/jas.2009-1781.
- CDCB Council on Dairy Cattle Breeding. CDCB National Performance Metrics: Herd Averages. Dairy Cattle Herd Average Yields (by year) from 2005 to 2024 for all breeds in the U.S. Recuperado el 9 de marzo de 2025 de <https://webconnect.uscdcb.com/#/national-performance-metrics>.
- Coleman, J., D. P. Berry, K. M. Pierce, A. Brennan, and B. Horan. (2010). Dry matter intake and feed efficiency profiles of 3 genotypes of Holstein-Friesian within pasture-based systems of milk production. *J. Dairy Sci.* 93:4318-4331
- de Haas, Y., Windig, J. J., Calus, M. P. L., Dijkstra, J., de Haan, M., Bannink, A., and Veerkamp, R. F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production in dairy cows and the genetic correlations with milk yield and feed intake. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 6121-6127.
- de Haas, Y., Pszczola, M., Soyeurt, H., Wall, E., and Lassen J. (2017) Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *J. Dairy Sci.* 100:855-870. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11246>.
- Garnsworthy, P.C., Difford, G.F., Bell, M.J., Bayat, A.R., Huhtanen, P., Kuhla, B., Lassen, J., Peiren, N., Pszczola, M., Sorg, D., Visker, M.H.P.W., Yan, T. (2019). Comparison of Methods to Measure Methane for Use in Genetic Evaluation of Dairy Cattle. *Animals (Basel)*. 9(10):837. doi: 10.3390/ani9100837.
- Goddard, M.E. (2012). Uses of genomics in livestock agriculture. *Anim. Prod. Sci.* 52 (3), 73-77.
- Gonzalez-Recio O., Zubiria, I., García-Rodríguez, A., Hurtado, A., and Atxaerandio, R. (2018). Short communication: Signs of host genetic regulation in the microbiome composition in 2 dairy breeds: Holstein and Brown Swiss. *J. Dairy Sci.* 101:2285-2292 <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13179>
- Hegarty, R.S., Goopy, J.P., Herd, R.M. and McCorkell, B. (2007). Cattle selected for lower residual intake have reduced daily methane production. *J. Anim. Sci.* 85:1479-1486. doi:10.2527/jas.2006-236.
- Kamalanathan, S., Houlahan, K., Miglior, F., Chud, T.C.S., Seymour, D.J., Hailemariam, D., Plastow, G., de Oliveira, H.R., Baes, C.F., and Schenkel, F.S. (2023). Genetic Analysis of Methane Emission Traits in Holstein Dairy Cattle. *Animals*. 13-1308. <https://doi.org/10.3390/ani13081308>
- Knapp, J.R., Laur, G.L., Vadas, P.A., Weiss, W.P., and Tricarico, J.M. (2014). *Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions.* *J. Dairy Sci.* 97 :3231-3261. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7234>.
- Lassen, J. and Løvendahl, P. (2016). Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *J. Dairy Sci.* 99:1959-1967. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10012>
- Manzanilla-Pech, C.I.V., Løvendahl, P., Mansan Gordo, D., Difford, G.F., Pryce, J.E., Schenkel, F., Wegmann, S., Miglior, F., Chud, T.C., Moate, P.J., Williams, S.R.O., Richardson, C.M., Stothard, P., and Lassen, J. (2020). Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response *J. Dairy Sci.* 104:8983-9001. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19889>.
- Pickering, N.K., Oddy, V.H., Basarab, J., Cammack, K., Hayes, B., Hegarty, R.S., Lassen, J., McEwan, J.C., Miller, S., Pinares-Patiño, C.S., and de Haas, Y. (2015). Animal board invited review: genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal* (2015), 9:9, pp 1431-1440 doi:10.1017/S1751731115000968
- Ravagnolo, O., and Misztal, I. (2000). Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *J. Dairy Sci.* 83:2126-2130.
- Roehe, R., Dewhurst, R.J., Duthie, C.A., Rooke, J.A., McKain, N., Ross, D.W., Hyslop, J.J., Waterhouse, A., Freeman, T.C., Watson, M. and Wallace, R.J. (2016) Bovine Host Genetic Variation Influences Rumen Microbial Methane Production with Best Selection Criterion for Low Methane Emitting and Efficiently Feed Converting Hosts Based on Metagenomic Gene Abundance. *PLoS Genet* 12(2): e1005846. doi:10.1371/journal.pgen.1005846
- Rojas de Oliveira, H., Sweett, H., Narayana, S., Fleming, A., Shadpour, S., Malchiodi, F., Jamrozik, J., Kistemaker, G., Sullivan, P., Schenkel, F., Hailemariam, D., Stothard, P., Plastow, G., Van Doormaal, B., Lohuis, M., Shannon, J., Baes, C., and Miglior, F. (2024). Development of genomic evaluation for methane efficiency in Canadian Holsteins. *JDS Communications*. 5:756-760. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2023-0431>.
- Tseten, T., Sanjorjo, R.A., Kwon, M., Kim, S.W. (2022). Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Animals. *J Microbiol Biotechnol.* 32(3):269-277. doi: 10.4014/jmb.2202.02019.
- Uribe, H.A., Kennedy, B.W., Martin, S.W., and Kelton, D.F. (1995). Genetic parameters for common health disorders of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 78:421-430.
- van Breukelen, A.E., Aldridge, M.N., Veerkamp, R.F., Koning, L., Sebek, L.B., and de Haas, Y. (2023). Heritability and genetic correlations between enteric methane production and concentration recorded by GreenFeed and sniffers on dairy cows. *J. Dairy Sci.* 106:4121-4132. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22735>.
- van Breukelen, A.E., Veerkamp, R.F., de Haas, Y., and Aldridge, M.N. (2024). Genetic parameter estimates for methane emission from breath during lactation and potential inaccuracies in reliabilities assuming a repeatability versus random regression model. *J. Dairy Sci.* 107:5853-5868. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24285>
- van Eenennaam, A.L., Wells, K.D. and Murray, J.D. Proposed U.S. regulation of gene-edited food animals is not fit for purpose. *npj Sci Food* 3, 3 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0035-y>
- Wall, E. (2010). Broadening breeding goals in a changing world. In *World Conf. Genet. Applied Livest. Prod.*, Leipzig, Germany.
- Wallace, R.J., Sasson, G., Garnsworthy, P.C., Tapio, I., Gregson, E., Bani, P., Huhtanen, P., Bayat, A.R., Strozzi, F., Biscarini, F., Snelling, T.J., Saunders, N., Potterton, S.L., Craigon, J., Minuti, A., Trevisi, E., Callegari, M.L., Cappelli, F.P., Cabezas-Garcia, E.H., Vilki, J., Pinares-Patino, C., Fliegerová, K.O., Mrázek, J., Sechovcová, H., Kopečný, J., Bonin, A., Boyer, F., Taberlet, P., Kokou, F., Halperin, E., Williams, J.L., Shingfield, K.J., and Mizrahi, I. (2019) A heritable subset of the core rumen microbiome dictates dairy cow productivity and emissions. *Sci Adv.* 2019 Jul 3;5(7):eaav8391. doi: 10.1126/sciadv.aav8391.
- Worden, D., and Hailu, G. (2020). Do genomic innovations enable an economic and environmental win-win in dairy production?. *Agricultural Systems* 181 (2020) 102807. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102807>
- Worku, D. (2024) Unraveling the genetic basis of methane emission in dairy cattle: a comprehensive exploration and breeding approach to lower methane emissions, *Animal Biotechnology*, 35:1, 2362677. doi: 10.1080/10495398.2024.2362677
- Zwald, N.R., Weigel, K.A., Chang, Y.M., Welper, R.D., and Clay, J.S. (2004). Genetic selection for health traits using producer recorded data. I. Incidence rates, heritability estimates, and sire breeding values. *J. Dairy Sci.* 87:4287-4294.

SALUD ANIMAL Y SU IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD LECHERA

Gerardo Federico Quiroz Rocha¹

¹CEIEPAA, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



La salud animal impacta la sostenibilidad de la producción lechera y cárnica a través de la mejora en la eficiencia productiva

Introducción

La ganadería bovina, actividad fundamental a nivel global, no sólo desempeña un papel esencial en la economía mundial como fuente de alimento, sino que también tiene un impacto significativo en la cultura y el desarrollo de numerosas comunidades. Sin embargo, el sector ganadero enfrenta retos crecientes relacionados con la salud animal y su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), directamente vinculadas al cambio climático. Por este motivo, la salud del vacuno se ha convertido en un tema de interés para los productores, investigadores y responsables de políticas ambientales.

La sostenibilidad es un concepto multidimensional que abarca aspectos ambientales, sociales y económicos. En las industrias láctea y cárnica, la sostenibilidad no sólo implica la reducción de impactos ambientales, como las emisiones de GEI o la mejora en la eficiencia del uso de recursos, sino también la optimización del bienestar y la salud de los animales. La salud animal es un factor esencial para el desarrollo de prácticas sostenibles en la producción bovina, ya que influye directamente en la eficiencia de la producción, la calidad de los productos y el impacto ambiental de las unidades productivas.

Aquí se abordarán los principales aspectos de la salud de los bovinos, y se analizará a la sostenibilidad productiva en el impacto social, económico y ambiental que tiene la ganadería en relación con los GEI, así como estrategias de mitigación de efectos adversos.

La salud animal en la productividad y sostenibilidad

La salud animal impacta la sostenibilidad de la producción lechera y cárnica a través de la mejora en la eficiencia productiva. Los vacunos sanos son más productivos, lo que significa que pueden generar mayores cantidades de leche o carne con un menor impacto en el uso de recursos, como el agua, la alimentación y la energía. En la práctica, un animal enfermo o débil no sólo produce menos, sino que puede requerir tratamientos veterinarios costosos, además de aumentar el uso de recursos para mantener su salud.

Statham *et al.* (2020) indicaron que la incidencia de enfermedades puede reducir drásticamente la producción de leche y carne, así como la calidad de éstas, de tal forma que mantener la salud animal es fundamental para maximizar la producción y reducir la necesidad de insumos adicionales, lo que contribuye directamente a la sostenibilidad de la actividad.

Enfermedades más importantes en bovinos

La salud en bovinos es esencial para mantener la productividad y la sostenibilidad del sector. La prevalencia de enfermedades puede ser un factor crítico en la productividad de una unidad ganadera. Las enfermedades que afectan a los bovinos se dividen en varias categorías, como infecciones, enfermedades metabólicas o parasitarias, entre otras. A continuación, se describen las principales enfermedades que impactan en la salud bovina.

Enfermedades respiratorias

Son comunes en la ganadería intensiva, especialmente en sistemas donde los animales son confinados en espacios cerrados o con poca ventilación. La neumonía y otras infecciones respiratorias son causadas por una combinación de factores, que incluyen virus como el virus respiratorio sincicial bovino (BRSV) y la parainfluenza bovina tipo 3 (PI3), además de bacterias como *Mannheimia haemolytica* y *Pasteurella multocida*, como describen Niskanen *et al.* (2020). La neumonía bovina, particularmente en terneros, tiene alta prevalencia. Esta enfermedad reduce la tasa de crecimiento y la eficiencia alimentaria; además, incrementa los costos de tratamiento y manejo. De acuerdo a Radostits *et al.* (2007), la neumonía puede causar pérdidas de hasta 20% en la producción de carne en sistemas intensivos.

Enfermedades metabólicas

Una de las categorías de enfermedades de mayor impacto son las metabólicas. Éstas ocurren principalmente debido a desequilibrios en la nutrición del ganado y son particularmente prevalentes en vacas lecheras en el periparto. Las enfermedades metabólicas más relevantes son:

Cetosis: es un trastorno metabólico que ocurre cuando el ganado no cubre sus requerimientos de energía a partir de los alimentos y utiliza reservas grasas, lo que lleva a una acumulación de cuerpos cetónicos en la sangre. Beede *et al.* (2019) describen que esta condición es común en vacas lecheras en posparto temprano y pico de lactación, ya que las demandas energéticas del cuerpo aumentan mientras que la ingesta de alimentos proporcionalmente

es insuficiente. La cetosis reduce la producción de leche, y también aumenta el riesgo de enfermedades secundarias, como la metritis y la laminitis.

Hígado graso: ésta es una condición en la que se acumula grasa en el hígado de los bovinos, generalmente asociada con una dieta rica en energía y pobre en fibra. Esto puede suceder en vacas en el periparto con alteraciones en la movilización de sus reservas de grasa. Mulligan *et al.* (2006) explicaron que los signos clínicos incluyen pérdida de apetito, debilidad y descenso en la producción de leche.

Acidosis ruminal: ocurre cuando hay un exceso de carbohidratos fermentables en la dieta, disminuyendo el pH del rumen, favoreciendo la proliferación de bacterias productoras de ácido láctico; por lo tanto, se afecta la digestión y, como consecuencia, hay disminución de la producción de leche y carne, como lo señalan Takahashi *et al.* (2020).

Alcalosis ruminal: la alcalosis metabólica es menos común, pero puede ocurrir en bovinos que consumen dietas excesivamente ricas en bicarbonatos o en situaciones de pérdida significativa de ácidos. Harris (1996) describió que los signos clínicos incluyen debilidad, temblores y un aumento en la frecuencia respiratoria.

Indigestión simple: éste un trastorno digestivo que se produce por la alteración del balance normal de la flora ruminal, a menudo debido a cambios bruscos en la dieta. Los síntomas incluyen pérdida de apetito, disminución en la producción de leche y acumulación de gas en el rumen, lo que puede provocar distensión abdominal, como los definió Jasper (2000).

**La salud digestiva en bovinos tiene
impacto directo en la cantidad de metano
que producen. Una mala salud ruminal
puede alterar la fermentación y aumentar
la producción de metano debido a un
desequilibrio en la microbiota ruminal**

Hipocalcemia: Lima *et al.* (2021) describen que la hipocalcemia, comúnmente llamada fiebre de la leche, se presenta cuando las concentraciones de calcio en la sangre del animal son bajas. Es especialmente común en vacas lecheras después del parto, debido a la demanda elevada de calcio para la producción de calostro y leche.

Mastitis

Común en vacas lecheras, ésta tiene un impacto significativo en la producción lechera y la salud animal. Esta condición puede ser causada por infecciones bacterianas, y se clasifica en mastitis subclínica y clínica. La primera es particularmente insidiosa, ya que puede disminuir la producción de leche sin ser detectada. La producción lechera se ve afectada de varias maneras, lo que se traduce en pérdidas económicas para los productores; además, la calidad de la leche se ve comprometida, lo que puede afectar la calidad y aceptación de los productos en el mercado.

De acuerdo con González *et al.* (2020), las vacas con mastitis pueden experimentar una reducción de hasta 30% en la producción de leche, así como incrementar vacas desechadas y mortalidad. Además, los tratamientos veterinarios y las medidas de control de la enfermedad generan costos adicionales para los productores. Por lo tanto, la prevención y el manejo adecuado de la mastitis son fundamentales para mantener la productividad y la rentabilidad en la industria lechera.

Enfermedades reproductivas

Estas enfermedades, como la retención de membranas fetales, la metritis y la endometritis, son frecuentes en vacas lecheras, especialmente en el posparto; pueden resultar en pérdidas económicas significativas debido a la infertilidad y a la disminución de la producción de leche. Sheldon *et al.* (2006) destacan que la prevención y el tratamiento de estas enfermedades son fundamentales para mantener tasas de concepción altas y una producción óptima.

Enfermedades de movilidad

Las enfermedades que afectan la movilidad, como la laminitis y la pododermatitis, son comunes en sistemas intensivos. Estas condiciones no sólo causan dolor y sufrimiento a los animales, sino que también resultan en pérdidas de producción. Green *et al.* (2002) describen que las condiciones adecuadas del suelo y la nutrición pueden

reducir la incidencia de estas enfermedades, mejorando así la salud del rebaño y la eficiencia productiva.

Enfermedades parasitarias

Las enfermedades parasitarias, tanto internas como externas, afectan a los bovinos significativamente. Cossío *et al.* (2021) indicaron que los parásitos gastrointestinales, como *Haemonchus sp* y *Cooperia sp*, reducen la eficiencia de la conversión alimenticia y pueden provocar pérdida de peso y diarrea. Ectoparásitos, como garrapatas y moscas, también son responsables de enfermedades como la babesiosis y la anaplasmosis y de zoonosis por patógenos que se pueden transmitir a los seres humanos y otros animales.

La FAO (2010) informó que el adecuado control parasitario puede aumentar la producción de carne y leche en un 10-30%.

Enfermedades misceláneas

Éstas afectan tanto la salud animal como la salud pública. Las siguientes enfermedades zoonóticas pueden llevar a restricciones en el comercio y afectar la sostenibilidad del sistema ganadero.

Brucelosis bovina: la brucelosis, causada por bacterias del género *Brucella*, es una enfermedad zoonótica que, entre otras especies, afecta a los bovinos. Se traduce en fuertes pérdidas económicas debido a abortos, disminución de la fertilidad y reducción de la producción, como mencionaron Godfroid *et al.* (2011). La erradicación de esta enfermedad mejora la salud animal, reduce la necesidad de tratamientos veterinarios y contribuye a la sostenibilidad económica de las unidades productivas.

Tuberculosis bovina: provocada por *Mycobacterium bovis*, ésta representa otro desafío crítico. O'Neill *et al.* (2014) señalan que esta enfermedad afecta la salud del ganado y, simultáneamente, significa riesgos para la salud pública. Es más redituable asumir los costos de la implementación de programas de control para mantener la productividad sobre los costos que implican las pérdidas económicas asociadas a la disminución del rendimiento y servicios veterinarios.

Encefalopatía espongiforme bovina (EEB), conocida como enfermedad de las vacas locas: de acuerdo con BSE Inquiry (2000), la EEB ha impactado profundamente la industria de la carne bovina, especialmente en Europa, donde llevó a restricciones comerciales severas y a la pérdida de

confianza del consumidor. Zinsstag *et al.* (2011) señalaron que la prevalencia ha disminuido, manteniéndose controles estrictos necesarios para minimizar estos riesgos que garanticen la seguridad alimentaria y mantener la productividad del sector.

Leptospirosis: como lo manifiesta De la Peña (2014), esta enfermedad, causada por alguna de las serovariedades patógenas del género *Leptospira* (actualmente más de 260), es considerada la zoonosis de mayor distribución en todo el mundo. La vacunación es una práctica común en el control de esta enfermedad, pero es protectora sólo para las serovariedades específicas sin crear inmunidad cruzada. La mortalidad puede ser hasta del 20% y existen efectos adversos de tipo reproductivo.

Impacto social, económico y medioambiental

Las enfermedades en los bovinos tienen implicaciones directas para la salud y el bienestar de los animales; además, afectan a la economía y a la sociedad en general. Las pérdidas económicas derivadas de la enfermedad de los animales tienen efectos negativos para los productores, las cadenas de suministro de productos lácteos y cárnicos y, en última instancia, para las economías rurales.

Impacto económico

El impacto económico de las enfermedades en bovinos llega a ser de consideración. Van der Fels-Klerx *et al.* (2022) explican que los costos directos incluyen los gastos en tratamientos veterinarios, medicinas y en la reposición animales en caso de mortalidad o bajo rendimiento. Los costos indirectos incluyen la baja productividad de los animales enfermos, lo cual se refleja en una menor producción de leche o carne, además de una posible disminución en la eficiencia reproductiva, así como decomisos a nivel de rastro.

Como ejemplo de lo anterior, la cetosis y la acidosis ruminal pueden reducir la eficiencia alimentaria y la producción de leche, lo que resulta en mayores costos para los productores. Van Saun (2010) mencionó que en casos graves, las enfermedades metabólicas también pueden incrementar la mortalidad, lo que supone una pérdida directa de ingresos para los ganaderos.

Impacto social

El impacto social de las enfermedades en bovinos es particularmente significativo en las áreas rurales, donde la ganadería puede ser la principal fuente de ingresos.

En muchos países en desarrollo, los pequeños ganaderos dependen de sus rebaños para su sustento. Las pérdidas de ganado pueden generar inestabilidad económica, lo que a su vez afecta la calidad de vida de las familias y las comunidades enteras. Además, Hussain *et al.* (2023) precisaron que las enfermedades zoonóticas como la brucelosis y la tuberculosis bovina pueden afectar no sólo la economía, sino también la salud pública, con lo que la seguridad alimentaria se ve comprometida. La mala calidad de los productos lácteos y cárnicos asociados a problemas de salud afecta la imagen de unidades productivas y cadenas de mercadeo ante el público consumidor.

Impacto medioambiental: gases de efecto invernadero

El impacto ambiental de la ganadería bovina es uno de los principales desafíos que enfrenta este sector productivo. Las emisiones de GEI procedentes de la ganadería contribuyen significativamente al cambio climático. La producción de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) son los principales gases emitidos en el proceso de producción de carne y leche.

1. Producción de gas metano en el vacuno

Los bovinos como otros rumiantes generan metano durante la fermentación anaeróbica que ocurre en el rumen. Durante este proceso, las bacterias y protozoos ruminales, descomponen la celulosa y otros compuestos complejos de los forrajes, liberando los GEI.

Producción de metano: las bacterias metanogénicas, las cuales convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano. Este gas es liberado en su mayoría a través de eructos, aunque también se elimina en menor cantidad a través de las heces y la orina.

El metano es uno de los GEI de mayor impacto generados por la ganadería. Aunque el metano es un gas natural producido por los animales como parte de su proceso digestivo, su acumulación en la atmósfera contribuye al calentamiento global.

Factores contribuyentes: Belanche *et al.* (2023) señalaron que la cantidad de metano producida depende de factores como el tipo y la calidad de la dieta, microambiente ruminal, genética y condición de salud de los animales.

2. Impacto ambiental del metano

El metano es un potente gas de efecto invernadero.



En su informe de 2021, el IPCC describe que aunque el metano representa sólo una fracción de las emisiones de GEI globales, su capacidad para atrapar el calor en la atmósfera es 28-36 veces más fuerte que el dióxido de carbono en un periodo de cien años (IPCC, 2021).

Ganadería y emisiones de metano: de acuerdo con Gerber *et al.* (2013), se estima que los rumiantes, incluidos los bovinos, son responsables de aproximadamente 30% de las emisiones de metano derivadas de actividades agrícolas.

3. Relación entre la salud en bovinos y la producción de metano

La salud digestiva en bovinos tiene impacto directo en la cantidad de metano que producen. Una mala salud ruminal puede alterar la fermentación y aumentar la producción de metano debido a un desequilibrio en la microbiota ruminal. Aquí se destacan algunos factores:

Dieta: las dietas de alta fibra pueden aumentar la producción de metano al requerir más fermentación en el rumen. Janssen (2010) menciona que una dieta mal balanceada, que ocasione trastornos como acidosis ruminal, puede elevar la producción de metano.

Microbiota ruminal: la salud del microbioma ruminal es fundamental para la digestión adecuada y la eficiencia de los nutrientes. Alteraciones en la microbiota por infecciones o malos manejos, pueden incrementar la producción de metano, conceptos descritos por Fernando *et al.* (2010).

Condiciones sanitarias y salud general: el bienestar general del vacuno influye en su eficiencia digestiva. Wright *et al.* (2004) señalan que, por ejemplo, el estrés y las enfermedades que afectan la digestión pueden causar cambios en la eficiencia de la conversión de alimentos en energía, aumentando la fermentación de fibra y, con ello, la producción de metano.

4. Otros impactos ambientales

Gestionar una adecuada salud animal además de promover el bienestar animal también reducen impactos ambientales al disminuir la necesidad de medicinas y tratamientos veterinarios. Esto no sólo reduce los residuos generados por el uso excesivo de productos farmacológicos, sino que también minimiza la contaminación del agua y el suelo, así como las emisiones de GEI.

Por otro lado, las vacas saludables y bien alimentadas son más eficientes en la conversión de alimentos en

productos lácteos y cárnicos. Cuando los animales reciben una dieta adecuada, se reduce la cantidad de residuos alimenticios, disminuyendo la necesidad de recursos adicionales y el impacto ambiental de la producción de raciones alimentarias como indican Beauchemin *et al.* (2008). Además, las vacas saludables tienen menos probabilidades de desarrollar enfermedades respiratorias o digestivas; esto, a su vez reduce la emisión de metano por la adecuada fermentación.

Estrategias para reducir la emisión de metano sin comprometer la salud del animal

Existen varias estrategias de manejo que pueden ayudar a reducir la producción de metano mientras se mantiene la salud animal:

Aditivos para la dieta: Marino *et al.* (2016) describen que el empleo de aditivos como compuestos a base de taninos o grasas poliinsaturadas son promisorias por tener actividad antimetanogénica en el rumen, ayudando a reducir las emisiones de este gas.

Mejoras en la dieta: Hristov *et al.* (2013) postulan que dietas más equilibradas en nutrientes y con mayor digestibilidad pueden reducir la producción de metano. Forrajes más digestibles e ingredientes de mayor calidad tienden a ser más eficientes, disminuyendo la fermentación innecesaria.

Manejo genético: Forabosco y Negrini (2019) explican que teniendo en consideración tasas reproductivas mayores como son fecundidad, fertilidad, índices abortivos bajos, etcétera, se busca aumentar la eficiencia y reducir la producción de metano. Además, la mejora genética ayuda a mejorar la capacidad de digestión y conversión de nutrientes, lo que reduce la fermentación ruminal.

Manejo de la salud ruminal: la salud digestiva depende de una apropiada fermentación para evitar trastornos. De acuerdo con Marino *et al.* (2016), el uso de probióticos previene enfermedades como la acidosis y reduce la producción de metano.

Manejo del estiércol: el estiércol es otra fuente significativa de GEI en la ganadería bovina. Mediante técnicas de mitigación, como su compostaje o su utilización en biodigestores, que permiten producir biogás, es posible reducir las emisiones de GEI (CGIAR, 2020).

Bienestar animal y prácticas sostenibles

El bienestar animal está intrínsecamente vinculado a

la sostenibilidad. La implementación de prácticas que promuevan la salud y el bienestar de los animales mejora su productividad y calidad de vida. Actualmente, además éstas contribuyen a una producción láctea y cárnica más sostenible desde una perspectiva ética. Bennedsgaard y Sorensen (2006) explican que el bienestar animal implica garantizar que los animales tengan acceso a condiciones de vida saludables, que se satisfagan sus requerimientos de espacio, comportamiento y alimentación, y reciban cuidados veterinarios apropiados.

El manejo adecuado de la salud animal puede prevenir el uso de tratamientos antibióticos innecesarios y el desarrollo de resistencia antimicrobiana, un problema creciente en la industria. El abuso de antibióticos no sólo representa un riesgo para la salud de los animales, sino que también puede tener consecuencias negativas para la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, promover una salud animal adecuada mediante prácticas de prevención es esencial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Además, la creciente demanda de productos lácteos y cárnicos provenientes de sistemas sostenibles está impulsando a esta industria a adoptar prácticas que

promuevan tanto el bienestar animal como la sostenibilidad ambiental. Los consumidores están cada vez más preocupados por el origen y metodología de producción de sus alimentos, y el cuidado y la salud de los animales es un factor importante en sus decisiones de compra. Por lo tanto, las unidades de producción bovina que adoptan prácticas de salud animal responsable no sólo mejoran su eficiencia productiva, sino que también pueden acceder a mercados de consumidores más exigentes.

Conclusión

La relación entre la salud en bovinos y las emisiones de GEI es un condición relevante para garantizar la sostenibilidad del sector ganadero. La mejora de la salud bovina, especialmente a través de la prevención de enfermedades particularmente la de tipo metabólico y el manejo adecuado del ganado, no sólo tiene beneficios directos en la productividad y el bienestar animal, sino que también puede desempeñar un papel crucial en la reducción de las emisiones de GEI. Adoptar un enfoque integral que contemple tanto la salud animal como la sostenibilidad teniendo en mente sus tres vertientes (económica, social y ambiental), permitirá avanzar hacia una ganadería más eficiente y responsable.

El manejo adecuado de la salud animal puede prevenir el uso de tratamientos antibióticos innecesarios y el desarrollo de resistencia antimicrobiana, problema de salud pública



Referencias

- Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F. and McAllister, T.A. (2008). "Nutritional management for enteric methane abatement: a review." *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 21-27. <https://doi.org/10.1071/EA07199>
- Beede, D.K., et al. (2019). "Metabolic disorders in dairy cattle: prevention and treatment." *Journal of Dairy Science*, 102(9), 8632-8641.
- Belanche A., Hristov A. N., van Lingen H. J., Denman S. E., Kebreab E., Schwarm A. (2023). Prediction of enteric methane emissions by sheep using an intercontinental database. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135523.
- Bennedsgaard, T. W., & Sorensen, J. T. (2006). Health and welfare of dairy cows: Effects of management and genetics on the sustainability of dairy farming. *Livestock Science*, 100(2-3), 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2005.09.005>
- Bovine Spongiform Encephalopathy (BSE) Inquiry. (2000). The Report of the BSE Inquiry. London: The Stationery Office.
- Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR) (2020). Inventory of greenhouse gas emissions from cattle, sheep and goats in Ethiopia (1994-2018) calculated using the IPCC Tier 2 approach. Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), East Africa.
- Cossio, B., et al. (2021). "Parasite control in dairy herds: A global review." *Veterinary Parasitology*, 292, 109354.
- De la Peña M.A. (2014). Leptospirosis. Una enfermedad de animales domésticos con impacto en salud pública. En: Romero N. C., Pérez G. R. *Zoonosis, cambio climático y sociedad*. Universidad Autónoma del Estado de México; Toluca, México.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2010). *Animal Production and Health Paper*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernando, S. C., et al. (2010). Microbial Community Dynamics in the Rumen of Dairy Cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 160(1-2), 1-9.
- Forabosco F., Negrini R. (2019). Improvement of economic traits and reduction of greenhouse gas emissions in sheep and goats in Central Asia. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 24:129-146. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9801-4>
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A. & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Green, L. E., et al. (2002). "The Impact of Lameness on Dairy Cattle Health and Production." *Journal of Dairy Science*, 85(7), 1550-1558.
- Godfroid, J., et al. (2011). "Brucellosis in Livestock and Wildlife." *Journal of Infection in Developing Countries*, 5(5), 755-764.
- González, A., Martínez, J., & Rodríguez, L. (2020). Impacto de la mastitis en la producción de leche y su manejo. *Revista de Veterinaria*, 35(2), 45-56
- Harris, B. (1996). "Alkalosis in Cattle." *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 12(3), 681-692.
- Hristov, A. N., et al. (2013). Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Animal Agriculture: A Review of Strategies and Technologies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 150, 101-114.
- Hussain, S., et al. (2023). "Zoonotic diseases and livestock management." *Journal of Animal Health*, 71(2), 85-93.
- Janssen, P. H. (2010). Review: Influence of Diet on Methane Production in Ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 166(1-2), 16-23.
- Jasper, D. E. (2000). "Simple Indigestion in Cattle." *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 16(3), 537-551.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate Change and Agriculture*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lima, F., et al. (2021). "Metabolic diseases in dairy cattle: A review of etiology and control strategies." *Animal Feed Science and Technology*, 279, 115015.
- Marino R., Atzori A.S., D'Andrea M., Iovane G., Trbalza-Marinucci M., Rinaldi L. (2016). Climate change: Production performance, health issues, greenhouse gas emissions and mitigation strategies in sheep and goat farming. *Small Ruminant Research*, 135, 50-59.
- Mulligan, F. J., et al. (2006). "Nutritional management of the dairy cow: The role of metabolic disease." *Veterinary Journal*, 171(1), 10-19.
- Niskanen, E.A., et al. (2020). "Bovine respiratory disease: A review." *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 34(4), 1270-1282.
- O'Neill, D. G., et al. (2014). "Bovine Tuberculosis in Cattle: Current Status and Future Directions." *Veterinary Journal*, 199(2), 130-137.
- Radostits, O. M., et al. (2007). *Veterinary Medicine: A Textbook of the Diseases of Cattle, Sheep, Pigs, Goats, and Horses*. London: Saunders Elsevier.
- Sheldon, I. M., et al. (2006). "The Effect of Uterine Infections on the Reproductive Performance of Cattle." *Veterinary Journal*, 171(3), 398-408.
- Statham J., Scott H., Statham S., Acton J., Williams A., Sandars D. (2020). *Dairy Cattle Health and Greenhouse Gas Emissions Pilot Study: Chile, Kenya and the UK*. Global Research Alliance in Agricultural Greenhouse Gases., United Kingdom.
- Takahashi, T., et al. (2020). "Rumen acidosis: Causes, symptoms, and management." *Animal Production Science*, 60(5), 546-553.
- Van der Fels-Klerx, H.J., et al. (2022). "Economic costs of bovine diseases." *Animal Health Economics*, 52(6), 1092-1105.
- Van Saun, R. J. (2010). Nutritional Management to Prevent Dairy Cattle Metabolic Diseases. *Journal of Dairy Science*, 93(8), 458-467.
- Wright, A. D. G., et al. (2004). Factors Influencing Rumen Methanogenesis. *Livestock Production Science*, 87(1), 105-115.
- Zinsstag, J., et al. (2011). Towards One Health: A Transdisciplinary Approach to Global Health. *Nature*, 472(7342), 4-6.

10

MANEJO DE LA BIOSEGURIDAD EN LAS UNIDADES DE PRODUCCIÓN LECHERA: LA PRIMERA LÍNEA DE DEFENSA PARA UNA SALUD ANIMAL, HUMANA Y AMBIENTAL

Adolfo Kunio Yabuta Osorio¹

Aurelio Guevara Escobar²

Mónica Cervantes Jiménez²

¹CEIEPAA, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México

²Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro



Factores como urbanización, deforestación y calentamiento global han alterado los ecosistemas, incrementando la proliferación de vectores zoonóticos y el contacto entre fauna silvestre y ganado

Introducción

La producción lechera enfrenta crecientes desafíos sanitarios y ambientales. Las epidemias recientes han evidenciado su vulnerabilidad ante enfermedades emergentes y zoonóticas, revelando la falta de estrategias preventivas efectivas (OMSA, 2025). Aunque estas crisis destacan la importancia de la bioseguridad, con el tiempo las medidas tienden a relajarse, lo que permite la reaparición de riesgos y expone a los sistemas productivos a nuevas amenazas (Denis-Robichaud et al., 2019; Maye y Chan, 2020). Según la OMS, 60% de las enfermedades infecciosas emergentes tienen origen animal, y en tres décadas se han identificado más de treinta nuevos patógenos humanos, 75% zoonóticos. Además, la OMSA estima que 18% de la población mundial depende de la ganadería y que para 2050 se necesitará un 70% más de proteína animal (FAO, 2007; OMSA, 2025).

La resistencia antimicrobiana (RAM) es considerada la principal crisis ambiental emergente por la FAO. Actualmente, está vinculada con 4.95 millones de muertes al año y, de no controlarse, podría convertirse en la principal causa de mortalidad para 2050, con diez millones de muertes anuales, superando al cáncer. Además, reduciría la producción mundial de alimentos en más de 7.5% (OMSA, 2025).

Factores como urbanización, deforestación y calentamiento global han alterado los ecosistemas, incremen-

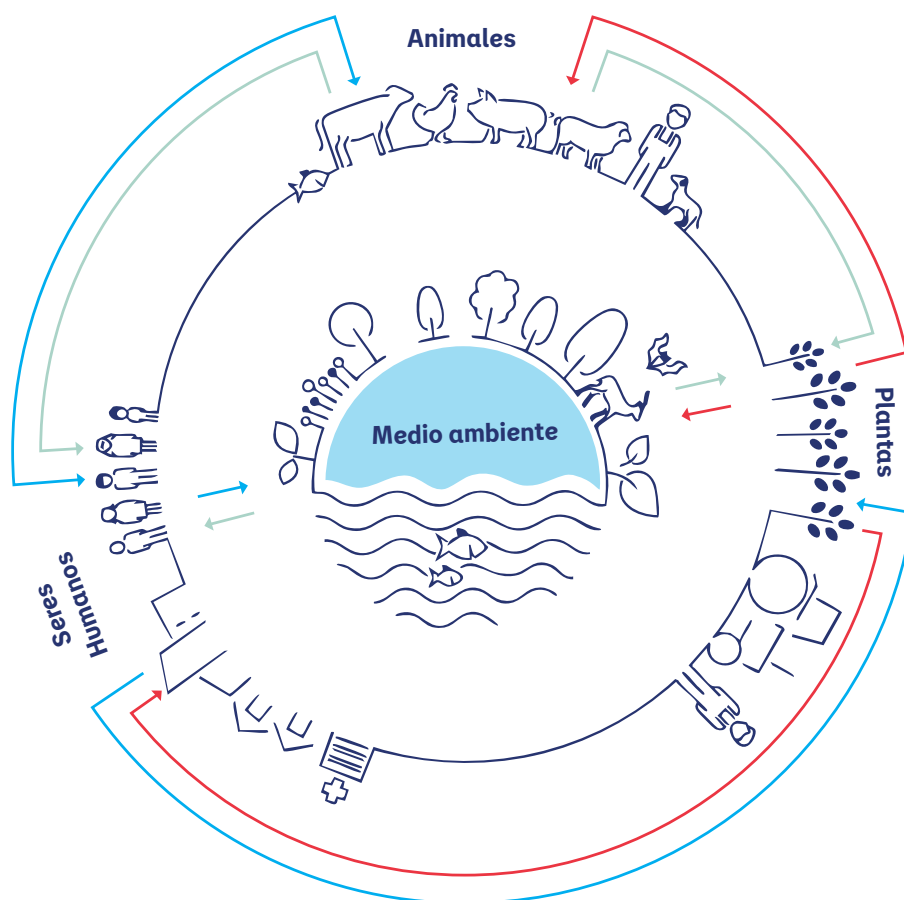
tando la proliferación de vectores zoonóticos (mosquitos, garrapatas, entre otros) y el contacto entre fauna silvestre y ganado (Wells, 2000). La pérdida de más de 25% de la cubierta forestal eleva el riesgo de transmisión de enfermedades, subrayando la necesidad de una bioseguridad integral que contemple la interacción entre salud animal, humana y ambiental (FAO, 2007; OMSA, 2009; Maye y Chan, 2020; OMSA, 2025).

La ganadería lechera forma parte de un ecosistema más amplio, donde factores como contaminación del agua y suelo, uso excesivo de antibióticos y cambio climático elevan el riesgo de transmisión de enfermedades y resistencia antimicrobiana (RAM). Enfrentar estos desafíos requiere una bioseguridad resiliente y sostenible (FAO, 2007; 2009; Bushra et al., 2024; OMSA, 2025).

Antes, la prevención en ganadería era sectorizada y reactiva, sin considerar el impacto ambiental o la salud pública (Wells, 2000; Faust et al., 2001; FAO, 2007). Sin embargo, el crecimiento demográfico y el comercio global han favorecido la propagación de enfermedades transfronterizas como fiebre aftosa y brucelosis, afectando la producción y la salud pública (Faust et al., 2001; Dargatz et al., 2002; SENASICA, 2014; OMSA, 2025). Por ello, la bioseguridad debe adoptar un enfoque integral y preventivo, alineado con Una Sola Salud (USS), que reconoce la interdependencia entre salud animal, humana y ambiental (FAO, 2007; FAO et al., 2023) (figura 1).

Los principios transversales de bioseguridad en la producción lechera se basan en aislamiento, restricción de movimiento, saneamiento y salud de hato

Figura 1. Interdependencia entre la sanidad animal, la salud de los seres humanos, las plantas y vínculo con los ecosistemas



Fuente: Tomado de Organización Mundial de Sanidad Animal OMSA (OMSA, 2025). Una sola salud - OMSA - Organización Mundial de Sanidad Animal.

Las enfermedades zoonóticas se transmiten por contacto directo, ingestión, inhalación, vectores y fómites (figura 2). Reservorios como bovinos, cerdos, aves y roedores facilitan la propagación de patógenos, mientras que factores ambientales como agua, alimentos y residuos contaminados, así como el contacto con fauna silvestre, aumentan el riesgo (Jaramillo-Arango et al., 2017).

Enfoque estructurado de la bioseguridad

La bioseguridad incluye medidas para prevenir la introducción, diseminación y salida de agentes infecciosos en la producción pecuaria (SENASICA, 2014). En producción lechera, su efectividad depende de identificar fuentes de contaminación y vías de contagio, para aplicar niveles de acción o principios transversales (Shortall et al., 2017; CPA, 2022; Baraitareanu, 2020) (figura 3).

Figura 2. Riesgo de transmisión de enfermedades entre especies animales y el ser humano

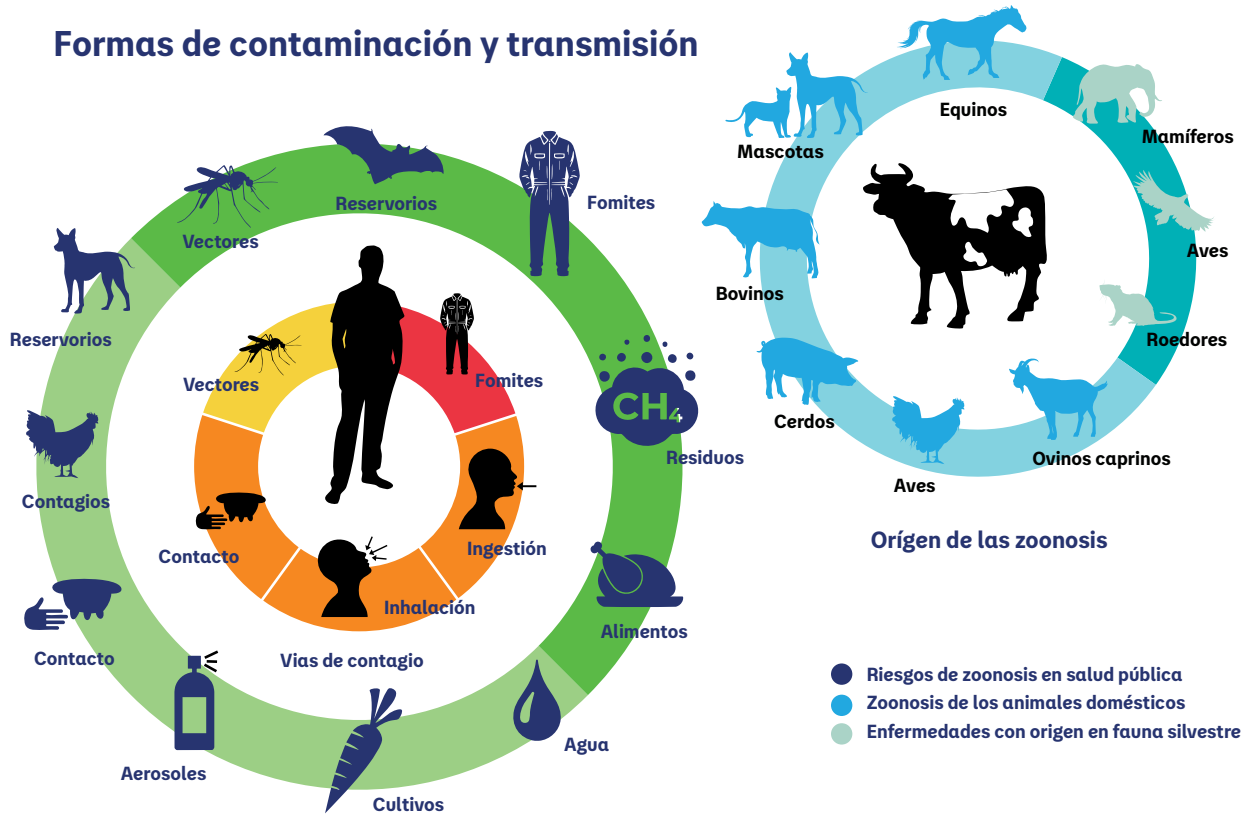
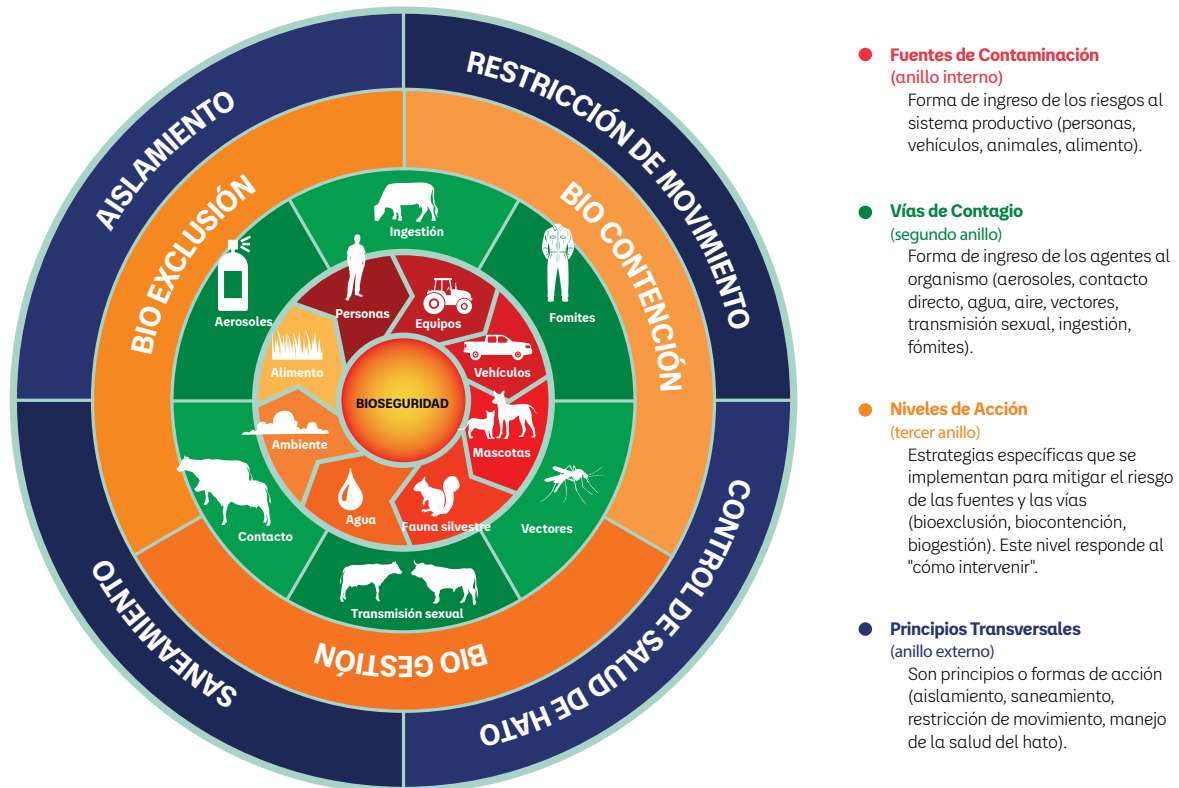


Figura 3. Interrelación de principios transversales y niveles de acción en la bioseguridad ganadera



La bioseguridad debe adoptar un enfoque integral y preventivo, alineado con Una Sola Salud

Fuentes de contaminación

Existen múltiples factores que pueden actuar como fuentes de contaminación (cuadro 1), incluyendo la introducción de nuevos animales, la presencia de fauna silvestre, plagas, vehículos, equipos compartidos, personas externas, agua, alimentos y el ambiente (Nitovski et al., 2013; Jaramillo-Arango, et al., 2017).

Cuadro 1. Fuentes de contaminación y su impacto en la bioseguridad

Fuente	Ejemplos
Animales nuevos y reingresos	Pueden introducir enfermedades al sistema, requiere cuarentena y monitoreo.
Mascotas	Perros, gatos y otras mascotas con libertad de movimiento pueden actuar como portadores de patógenos al entrar en contacto con áreas contaminadas o animales externos.
Fauna silvestre	Aves, ciervos, jabalíes, zorros y otras especies pueden introducir patógenos al contaminar agua, tierra o alimentos.
Plagas y roedores	Ratas, ratones, moscas, garrapatas y otros vectores biológicos contaminan alimentos y superficies, sirviendo como vehículos para virus, bacterias y parásitos.
Vehículos	Transportan patógenos en neumáticos y superficies, deben ser desinfectados.
Equipos compartidos	Herramientas y maquinaria pueden ser vectores de contagio si no se desinfectan.
Productos animales	Leche, carne y otros subproductos pueden contener patógenos.
Personas externas	Trabajadores y visitantes pueden introducir enfermedades sin medidas de bioseguridad.
Agua contaminada	Fuente común de transmisión de patógenos, debe garantizarse su calidad.
Alimentos y forrajes	Pueden estar contaminados con bacterias, hongos o residuos.
Ambiente	Factores como suelo, aire y superficies pueden favorecer la propagación de enfermedades.

Fuente. Villarroel, 2007; Astorga-Márquez, 2007; Mee et al., 2012; Nitovski et al., 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Denis-Robichaud et al., 2019.

Vías de transmisión de enfermedades o de contagio

Los agentes patógenos ingresan al organismo del ganado a través de diversas vías de transmisión. Comprender estos mecanismos es fundamental para implementar medidas de bioseguridad adecuadas y prevenir su propagación.

Contacto Directo

El contacto directo ocurre cuando una vaca infectada transmite patógenos a otros animales a través de heridas, mucosas o la piel, mediante secreciones como sangre, saliva, orina y heces. También puede darse por interacciones como contacto nariz con nariz, lamidos, roces o mordeduras (Villarroel, 2007; NMPF, 2022). Para reducir este riesgo, es

necesario aplicar medidas como el aislamiento de animales enfermos, estrategias de manejo y protocolos de bioseguridad. Estas acciones, junto con una vigilancia constante, fortalecen la bioseguridad y minimizan la transmisión por contacto directo en los sistemas productivos (cuadro 2).

Cuadro 2. Medidas preventivas para el control del contacto directo

Separación de animales	Mantener aislados a los animales enfermos o recién introducidos hasta garantizar que no representan un riesgo para el resto del hato.
Control en la línea de cercas	Evitar el contacto entre animales de diferente estado de salud, vacunación o procedencia.
Pruebas de diagnóstico	Realizar pruebas regulares para detectar enfermedades preocupantes y retirar animales infectados antes de que puedan transmitirlos.
Semen y embriones seguros	Asegurar que los toros, el semen y los embriones provengan de fuentes certificadas con altos estándares sanitarios.
Vacunación	Proteger al ganado contra enfermedades comunes transmitidas por contacto directo para reducir la susceptibilidad del hato.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee *et al.*, 2012; Nitovski *et al.*, 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall *et al.*, 2017; Denis-Robichaud *et al.*, 2019.

Aerosoles (inhalación)

La transmisión por aerosoles ocurre cuando animales infectados liberan gotas con patógenos al exhalar, toser o estornudar, que pueden ser inhaladas por otros, propagando enfermedades, especialmente en espacios mal

ventilados o hacinados (NMPF, 2022). La acumulación de patógenos en el aire y el hacinamiento aumentan el riesgo. Para prevenirla, es esencial mejorar la ventilación, evitar la sobrepoblación y optimizar el manejo ambiental (cuadro 3).

Cuadro 3. Medidas preventivas para controlar la transmisión por aerosoles

Minimizar el hacinamiento	Evitar la concentración excesiva de animales en áreas cerradas, especialmente entre aquellos con diferente estado de salud o vacunación.
Ventilación adecuada	Asegurar una buena circulación de aire en establos y áreas interiores para evitar la acumulación de microorganismos.
Control de humedad y temperatura	Mantener niveles de humedad entre el 50% y el 75% en interiores y evitar temperaturas extremas que favorezcan la supervivencia de bacterias (en condiciones cálidas) o virus (en condiciones frías).
Aislamiento de animales enfermos	Separar a los animales infectados para evitar que compartan el espacio aéreo con los sanos.
Vacunación	Proteger al hato contra enfermedades respiratorias transmitidas por aerosoles, mejorando su resistencia ante patógenos comunes.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee *et al.*, 2012; Nitovski *et al.*, 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall *et al.*, 2017; Denis-Robichaud *et al.*, 2019.

Transmisión oral (ingestión)

La transmisión por ingestión ocurre cuando los animales consumen agua, alimento u objetos contaminados con patógenos presentes en estiércol, saliva u orina (Mee et al., 2012). En lactantes, también puede darse por leche o calostro sin tratar. El riesgo aumenta con la contaminación por otros animales o fauna silvestre y el hábito de lamer o masticar objetos en el corral (Villarroel, 2007; NMPF, 2022).

Para prevenirla, es clave mantener la higiene en áreas de alimentación y manejo, limpiar y desinfectar corrales y equipos, y restringir el acceso a fuentes de contaminación (cuadro 4). La limpieza es la primera línea de defensa, protegiendo la salud del hato y mejorando la eficiencia del sistema productivo.

Cuadro 4. Medidas preventivas para la transmisión oral

Alimento y agua de calidad	Suministrar insumos libres de contaminación y almacenarlos adecuadamente. Restringir el acceso de plagas.
Higiene en áreas de manejo	Limpiar y desinfectar regularmente comederos, bebederos y áreas de manejo. Evitar que objetos contaminados sean accesibles para los animales.
Control de secreciones y residuos	Prevenir la contaminación cruzada y aplicar buenas prácticas de manejo de residuos orgánicos.
Tratamiento de insumos	Pasteurizar leche y calostro antes de suministrarlos. Usar antiparasitarios aprobados respetando los tiempos de retiro.
Vacunación	Inmunizar al ganado contra enfermedades transmitidas por vía oral para reforzar su resistencia.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee et al., 2012; Nitovski et al., 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall et al., 2017; Denis-Robichaud et al., 2019.

Fómites (objetos contaminados)

La transmisión por fómites ocurre cuando objetos contaminados propagan bacterias, virus o parásitos, representando un riesgo para la bioseguridad (Mee et al., 2012; NMPF, 2022). Los principales fómites incluyen ropa, calzado, herramientas, remolques, unidades de ordeño e instrumentos veterinarios reutilizados. También, materiales

en contacto con estiércol, cadáveres y alimentos sin desinfección pueden ser vehículos de contagio. Para reducir el riesgo, es esencial aplicar protocolos de limpieza y desinfección, asegurando un manejo adecuado de herramientas, vestimenta e instalaciones (cuadro 5), lo que fortalece la bioseguridad en la producción.

Cuadro 5. Medidas preventivas para el control de fómites

Desinfección de equipos	Limpiar y desinfectar todas las herramientas y equipos que entren en contacto con animales, especialmente entre grupos diferentes.
Ropa y calzado específicos	Usar vestimenta y botas específicas para trabajar con diferentes grupos de animales (terneros, adultos, enfermos o en cuarentena).
Manejo de animales enfermos	Separar los equipos utilizados para animales en cuarentena o enfermos. Si no es posible, limpiar y desinfectar entre usos.
Orden de trabajo	Manipular primero a los animales jóvenes o sanos antes de atender a los enfermos o en cuarentena.
Ordeño seguro	Establecer salas de hospital separadas para ordeñar animales enfermos o, en su defecto, ordeñarlos al final y desinfectar los equipos de inmediato.
Transporte limpio	Limpiar y desinfectar remolques de ganado después de transportar animales enfermos, recién adquiridos o de otro hato.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee et al., 2012; Nitovski et al., 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall et al., 2017; Denis-Robichaud et al., 2019.

Vectores

Los vectores, como insectos y roedores, transportan patógenos entre animales y humanos, facilitando la propagación de enfermedades. La transmisión puede ser mecánica, cuando el vector traslada patógenos sin infectarse (ej. moscas que contaminan alimentos y superficies), o biológica, cuando el vector es huésped intermediario

y transmite la enfermedad por picaduras o excreciones (ej. mosquitos y garrapatas) (NMPF, 2022). Para reducir el riesgo de transmisión, es fundamental un buen manejo ambiental, limpieza y la implementación de estrategias de manejo integral de plagas para disminuir la población de vectores (cuadro 6).

Cuadro 6. Medidas preventivas para el control de vectores

Eliminación de criaderos	Eliminar el agua estancada, donde los mosquitos pueden reproducirse.
	Retirar materia orgánica en descomposición, como estiércol y alimento viejo, que atraen y sirven de criaderos para moscas.
Control directo de vectores	Usar plaguicidas tópicos, orales o inyectables aprobados para animales productores de alimentos, respetando los tiempos de retiro de leche y carne.
	Instalar trampas y cebos para roedores, siguiendo las instrucciones de uso de manera segura.
Protección de recursos	Almacenar alimentos en contenedores sellados, como recipientes metálicos o plásticos resistentes.
	Proteger sustitutos de leche y otros insumos para terneros en envases a prueba de plagas.
Manejo del entorno	Implementar prácticas regulares de limpieza en áreas de almacenamiento y manejo del hato.
	Vigilar poblaciones de vectores mediante inspecciones periódicas y responder rápidamente a infestaciones.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee et al., 2012; Nitovski et al., 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall et al., 2017; Denis-Robichaud et al., 2019.

Los agentes patógenos ingresan al organismo del ganado a través de diversas vías de transmisión. Comprender estos mecanismos es fundamental para implementar medidas de bioseguridad adecuadas y prevenir su propagación

Transmisión sexual o reproductiva

La transmisión sexual o reproductiva ocurre durante el apareamiento o mediante semen y embriones contaminados en reproducción asistida. También incluye la transmisión vertical, donde los patógenos pasan de la madre a la cría durante la gestación, parto o lactancia.

Un ejemplo es el apareamiento natural, donde los toros pueden transmitir enfermedades a las vacas. En la inseminación artificial, el uso de semen contaminado representa

un riesgo. La transferencia de embriones puede favorecer la infección si las receptoras o los embriones están contaminados. En la transmisión vertical, los patógenos pueden pasar de la madre a la cría a través de la placenta, el parto o la leche (NMPF, 2022).

El control de esta transmisión usando medidas como el monitoreo sanitario y el control de insumos son esenciales para evitar su propagación (cuadro 7).

Cuadro 7. Medidas preventivas para el control de la transmisión sexual

Pruebas sanitarias	Realizar exámenes regulares a los toros y vacas para detectar enfermedades reproductivas.
	Verificar la sanidad de los donantes de semen y embriones.
	Supervisar la salud de las hembras gestantes para identificar riesgos de transmisión vertical.
Certificación de insumos reproductivos	Asegurar que el semen y los embriones provengan de fuentes certificadas libres de enfermedades.
	Usar solo insumos tratados y procesados bajo estándares sanitarios reconocidos.
Manejo de crías	Separar a las crías nacidas de madres infectadas para evitar la propagación de patógenos.
	Pasteurizar la leche y el calostro antes de ofrecérselos a las crías para reducir el riesgo de transmisión.
Vacunación	Proteger al hato contra enfermedades de transmisión sexual y vertical como la leptospirosis, brucelosis o tricomoniasis.

Fuente. Villarroel, 2007; Chahine y Ahola, 2008; Astorga-Márquez, 2007; Mee et al., 2012; Nitovski et al., 2013; Callejo, 2016a; Callejo, 2016b; Shortall et al., 2017; Denis-Robichaud et al., 2019.

Niveles de acción en la bioseguridad

El éxito de un plan de bioseguridad depende de estrategias que controlen fuentes de contaminación y vías de contagio. Para ello, se aplican tres niveles: bioexclusión, que evita el ingreso de enfermedades; biocontención, que limita su propagación; y biogestión, que supervisa y optimiza las medidas en el tiempo (Villarroel, 2007; Mee et al., 2012). Estos niveles son complementarios y deben integrarse según el contexto productivo. Una bioexclusión reduce la necesidad de biocontención, mientras ésta minimiza brotes y facilita la gestión sanitaria. La biogestión garantiza la sostenibilidad y mejora las estrategias preventivas.

Bioexclusión: la primera barrera de defensa

La bioexclusión es la primera línea de defensa en bioseguridad, diseñada para impedir la entrada de patógenos y proteger la sanidad del hato, especialmente en sistemas libres de enfermedades (Mee et al., 2012). Su aplicación es clave en la recepción de nuevos animales, control de accesos y el uso de barreras contra vectores (SENASICA, 2014). Las medidas esenciales incluyen cuarentena, pruebas sanitarias, restricción y desinfección de accesos, barreras contra fauna silvestre y el uso de ropa y calzado exclusivos. Además, se garantiza el suministro de alimentos y agua certificados. Una bioexclusión eficiente reduce el riesgo de enfermedades, minimiza intervenciones y fortalece la sostenibilidad sanitaria.

Biocontención: control dentro del sistema

La biocontención evita la propagación de enfermedades dentro del establo cuando un patógeno ya está presente. Su objetivo es proteger animales, personas y ambiente mediante aislamiento, restricción de movimientos, desinfección y manejo de residuos. Estas medidas se activan en momentos críticos para controlar brotes y reducir pérdidas (SENASICA, 2014; Sayers et al., 2013).

Biogestión: una estrategia a largo plazo

La biogestión es un nivel avanzado de bioseguridad que permite el monitoreo continuo y la optimización de bioexclusión y biocontención (Chahine & Ahola, 2008; Mohammed & El Zubeir, 2015). Su enfoque previene la introducción y propagación de patógenos, garantizando la eficacia y sostenibilidad de las medidas sanitarias (Sayers et al., 2013). A través de supervisión constante y adaptación a nuevas amenazas, fortalece la resiliencia del sistema productivo, protegiendo la salud del hato y optimizando la producción de forma segura y eficiente.

Principios transversales de la bioseguridad

Los principios transversales de bioseguridad refuerzan la prevención y control de enfermedades, garantizando un sistema productivo seguro y eficiente. Abarcan los niveles de bioexclusión, biocontención y biogestión, asegurando un enfoque integral para minimizar riesgos. El aislamiento limita el contacto entre animales mediante cuarentenas y separación por grupos (figura 4). La restricción de movimiento regula el tránsito de personas, vehículos y equipos para evitar la propagación de patógenos. El saneamiento mantiene la limpieza de instalaciones y la gestión adecuada de estiércol, residuos biológicos y cadáveres. La salud del hato fortalece la inmunidad a través de vacunación, monitoreo sanitario y control de plagas y vectores.

Aplicar estos principios garantiza un plan de bioseguridad sólido, reduciendo enfermedades, mejorando la sanidad del hato y optimizando la productividad del sistema ganadero.

Aislamiento: limitar el contacto con fuentes de riesgo

El aislamiento es clave en bioseguridad, ya que previene la interacción del hato con fuentes de contaminación, reduciendo la exposición a agentes infecciosos provenientes de otros animales, personas, equipos o el entorno.

Se implementan barreras físicas como cercas y puertas para restringir el acceso de fauna silvestre y plagas, además de mantener un hato cerrado, separando animales sanos, enfermos y recién introducidos. También se restringe el acceso de personas externas sin protocolos de higiene y se aplican estrategias, como separación por grupos, cuarentena y restricción de movimiento, para evitar la diseminación de enfermedades (Chahine y Ahola, 2008; Mohammed y El Zubeir, 2015; Callejo, 2016b; Denis-Robichaud et al., 2019; Buhman et al., 2000).

Saneamiento: mantener la limpieza y la higiene

El saneamiento es clave para un entorno productivo seguro y funcional. Comprende la limpieza para eliminar suciedad visible, la higienización de superficies y equipos, y la desinfección con métodos químicos o físicos. El manejo de residuos y estiércol previene focos de contaminación, mientras que el control de vectores y plagas reduce la transmisión de enfermedades. Además, el tratamiento de aguas residuales y la disposición segura de cadáveres evitan la propagación de patógenos. Aplicar estas medidas disminuye la carga microbiana, fortalece la bioseguridad y mejora la sostenibilidad del sistema productivo (Buhman et al., 2000; Astorga-Márquez, 2007).

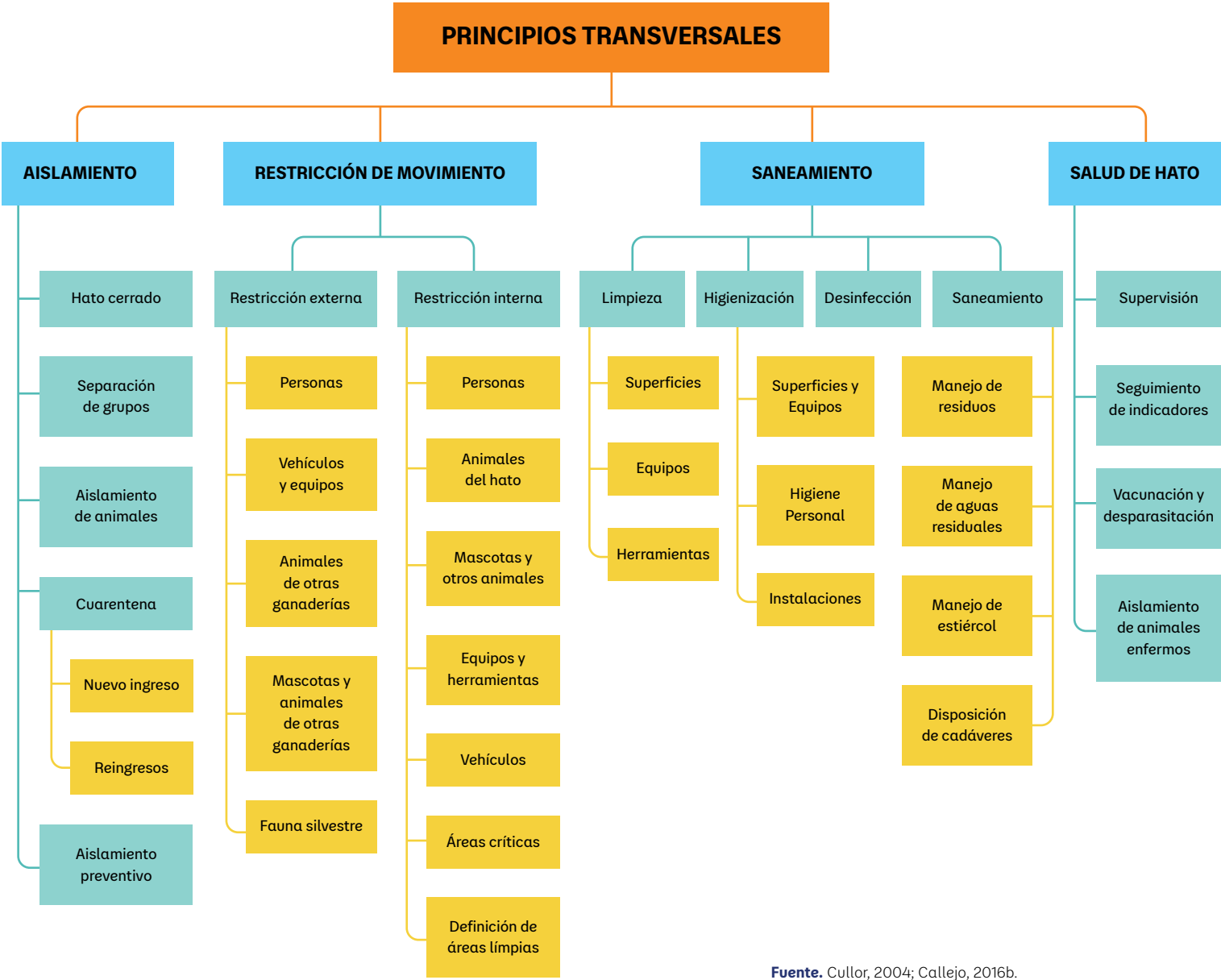
Restricción de movimiento: controlar el flujo de animales, personas y vehículos

La restricción de movimiento controla el tránsito de personas, animales, vehículos y equipos para minimizar la introducción y propagación de patógenos, fortaleciendo la sanidad y sostenibilidad del sistema. Incluye el control de acceso a personas y equipos, restricciones internas, registro, vestimenta adecuada y desinfección para trabajadores y visitantes. Además, se desinfectan vehículos y equipos al ingreso y salida. La segregación de animales por rutas separadas y la zonificación sanitaria de áreas limpias y críticas previene el contacto con fauna silvestre para evitar contagios (Mohammed y El Zubeir, 2015; Callejo, 2016b; Buhman et al., 2000).

Control de la salud del hato: supervisar y promover la sanidad del ganado

Mantener la salud del hato fortalece la inmunidad colectiva y reduce la susceptibilidad a enfermedades, complementando el aislamiento, saneamiento y restricción de movimiento para un sistema más resiliente. La supervisión sanitaria diaria y el análisis de producción,

Figura 4. Principios transversales de la bioseguridad en la producción lechera



Fuente. Cullor, 2004; Callejo, 2016b.

reproducción y consumo permiten detectar problemas a tiempo, mientras que un plan veterinario facilita la contención de brotes (Mohammed y El Zubeir, 2015). El manejo de problemas crónicos requiere vigilancia y ajustes en tratamientos.

La bioexclusión, saneamiento y control de movimiento son esenciales para una biogestión eficiente. Adoptar estas estrategias garantiza una producción segura y sostenible, preparada para desafíos sanitarios actuales y futuros.

Conclusión: bioseguridad y Una Sola Salud

La bioseguridad en la producción de leche es un pilar

fundamental para el enfoque de Una Sola Salud, ya que garantiza la prevención de enfermedades que pueden afectar a los animales, los seres humanos y el medio ambiente. Al implementar medidas integrales de bioseguridad, se reduce el riesgo de zoonosis, la contaminación ambiental y la propagación de patógenos. La cooperación entre productores, veterinarios y especialistas en salud pública es clave para un sistema resiliente y preparado para futuros desafíos sanitarios. Esto no sólo asegura la calidad e inocuidad de la leche, sino que también protege la salud pública y promueve sistemas productivos sostenibles.

Referencias

- Astorga-Márquez, R. J. (2007). Estrategias de prevención frente a enfermedades: La bioseguridad en la granja. *Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*. Anales, 20(1).
- Baraitareanu, S., & Vidu, L. (2020). Dairy farms biosecurity to protect against infectious diseases and antibiotics overuse. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93200>
- Buhman, M., Dewell, G., & Griffin, D. D. (2000). G00-1411 *Biosecurity basics for cattle operations and good management practices (GMP) for controlling infectious diseases*. University of Nebraska - Lincoln Extension. <https://www.researchgate.net/publication/228885314>
- Bushra, A., Rokon-Uz-Zaman, M., Rahman, A. S. S., Runa, M. A., Tasnuva, S., Peya, S. S., Parvin, M. S., & Islam, M. T. (2024). Biosecurity, health and disease management practices among the dairy farms in five districts of Bangladesh. *Preventive Veterinary Medicine*, 225, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106142>
- Callejo, R. A. (2016a). *Bioseguridad en las granjas de vacuno de leche*. Servet.
- Callejo R.A. (2016b). Bioseguridad en las granjas de producción de leche de vaca. *Producción Animal*, 294, 58-64. https://oa.upm.es/40202/1/INVE_MEM_2016_217242.pdf
- Chahine, M., and Ahola, J. (2008). Importancia de los planes de bioseguridad en las lecherías. *El Lechero*, 3(6), 10-11. <https://www.el-lechero.com/digital-edition/2008/0608el.pdf>
- Comisión México-Estados Unidos para la Prevención de la Fiebre Aftosa y otras Enfermedades Exóticas de los Animales (CPA). (2022). Bioseguridad como herramienta en la salud animal. ¿Sabías que? *Boletín Informativo*, 6-7. https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/files/2022/agosto/ABRIL2022_b45304e3-43cb-476b-9d82-2b54a2e7631f.pdf
- Cullor, J. S. (2004). Applied biosecurity for dairy farms. En *Proceedings of the 23rd World Buiatrics Congress, Québec, Canada*. World Buiatrics Congress. <https://www.albertaanimalhealthsource.ca/sites/default/files/uploads/wbc2004-cullor-simple.pdf>
- Dargatz, D. A., Garry, F. B., & Traub-Dargatz, J. L. (2002). Introducción a la bioseguridad de las explotaciones ganaderas. *Las Clínicas Veterinarias de América del Norte. Práctica de Animales de Consumo*, 18, 1-5. [https://doi.org/10.1016/s0749-0720\(02\)00002-6](https://doi.org/10.1016/s0749-0720(02)00002-6)
- Denis-Robichaud, J., Kelton, D. F., Bauman, C. A., Barkema, H. W., Keefe, G. P., & Dubuc, J. (2019). Biosecurity and herd health management practices on Canadian dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 9536-9547. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15921>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2007). *Instrumentos de la FAO sobre la bioseguridad*. Roma. <https://www.fao.org/4/a1140s/a1140s00.pdf>
- Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). (2009). *Un mundo, una salud*. *Boletín de la OIE*, (2), 1-2. <https://www.woah.org/app/uploads/2021/03/bull-2009-2-esp.pdf>
- Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). (2025). Una sola salud. Organización Mundial de Sanidad Animal. <https://www.woah.org/es/que-hacemos/iniciativas-mundiales/una-sola-salud/>
- FAO, PNUMA, OMS y OMSA. (2023). *Plan de acción conjunto “Una sola salud” (2022-2026): Trabajar juntos por la salud de los seres humanos, los animales, las plantas y el medio ambiente*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc2289es>
- Faust, M. A., Kinsel, M. L., & Kirkpatrick, M. A. (2001). Characterizing biosecurity, health, and culling during dairy herd expansions. *Journal of Dairy Science*, 84(4), 955-965. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74554-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74554-7)
- Jaramillo-Arango, C. J., Campuzano-Ocampo, V. M., y Romero-López, J. A. (2017). *Salud pública y medicina preventiva veterinaria*. Trillas.
- Maye, D., and Chan, K. W. (2020). On-farm biosecurity in livestock production: Farmer behaviour, cultural identities and practices of care. *Emerging Topics in Life Sciences*, 4(5), 521-530. <https://doi.org/10.1042/ETLS20200063>
- Mee, J. F., Geraghty, T., O'Neill, R., & More, S. J. (2012). Bioexclusion of diseases from dairy and beef farms: Risks of introducing infectious agents and risk reduction strategies. *The Veterinary Journal*, 194(2), 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.07.001>
- Mohammed, A. E. I., and El Zubeir, I. E. M. (2015). Some biosecurity measurements in different dairy farms in Khartoum State, Sudan. *Journal of Veterinary Medicine and Animal Health*, 7(3), 85-93. <https://doi.org/10.5897/JVMAH2014.0321>
- National Milk Producers Federation (NMPF). (2022). *Everyday biosecurity reference manual: Version 1*. https://nationaldairyfarm.com/wp-content/uploads/2022/10/FARM_Everyday-Biosecurity-Version-1_Reference-Manual_FINAL_101822_Web_pages.pdf
- Nitovski, A., Milenković, M., Radović, B., Milanović, V., Grčak, D., & Grčak, M. (2013). Making a plan of biosecurity on a cattle farm. *Macedonian Journal of Animal Science*, 3(1), 9-15. http://www.mjas.ukim.edu.mk/files/MJAS-02-4_-2012_-132-Nitovski.pdf
- Sayers, R. G., Sayers, G. P., Mee, J. F., Good, M., Bermingham, M. L., Grant, J., & Dillon, P. G. (2013). Implementing biosecurity measures on dairy farms in Ireland. *The Veterinary Journal*, 197(2), 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.11.017>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2014). Bioseguridad en granjas de producción pecuaria. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. SAGARPA. 08 de octubre de 2014. <https://www.gob.mx/senasica/prensa/bioseguridad-en-granjas-de-produccion-pecuaria#:~:text=La%20Bioseguridad%20se%20define%20como,una%20unidad%20de%20producci%C3%B3n%20pecuaria>
- Shortall, O., Green, M., Brennan, M., Wapenaar, W., & Kaler, J. (2017). Exploring expert opinion on the practicality and effectiveness of biosecurity measures on dairy farms in the United Kingdom using choice modeling. *Journal of Dairy Science*, 100(3), 2016-11435. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11435>
- Villarroel, A. (2007). Practical biosecurity on dairy farms. *Conference Paper*, March 2007. <https://doi.org/10.13140/2.1.3657.7928>
- Wells, S. J. (2000). Biosecurity on dairy operations: Hazards and risks. *Journal of Dairy Science*, 83(10), 2380-2386. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75127-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75127-7)

INSTALACIONES Y EQUIPAMIENTO: SU IMPACTO EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Vicente Lemus Ramírez¹
José Guadalupe García Muñiz²

¹CEIEPAA, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México

²Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo



En México, la producción de leche es una de las actividades pecuarias de mayor impacto económico en el sector primario del país, y es la actividad pecuaria que crea una mayor cantidad de empleos directos e indirectos

La producción de leche es una actividad agropecuaria de gran relevancia a nivel mundial. En México, es una de las actividades pecuarias de mayor impacto económico en el sector primario del país, y es la actividad pecuaria que crea una mayor cantidad de empleos directos e indirectos. La producción de leche en México procede principalmente del modelo intensivo con ganado en confinamiento (con alta densidad de vacas por unidad de superficie), con un aporte de alrededor de 65% y es en este sector lechero donde mayor tecnología se aplica para el manejo total del hato. El porcentaje restante de leche lo cubre la ganadería extensiva de doble propósito (para la venta de crías y leche); dentro de esta última se incluyen las unidades de producción a nivel familiar o a pequeña escala.

Es así como la ganadería lechera en México, como en muchos países, apoya la economía nacional aportando alimentos de alta calidad nutritiva. No obstante su importancia social y económica, esta actividad contribuye a las emisiones de gases de “efecto invernadero” (GEI), que son responsables del calentamiento global del planeta. El problema de este calentamiento atmosférico es un asunto multifactorial en donde las actividades antropogénicas son las principales causas que lo aceleran, como es el caso de la producción lechera.

En la ganadería lechera, la emisión más importante de GEI proviene de la fermentación entérica de las vacas durante el proceso degradativo del alimento por la microflora del rumen, produciendo metano (CH_4), el cual

después es emitido a la atmósfera. Smith *et al.* (2014) estimaron que la agricultura a nivel global contribuye con alrededor de 11% de las emisiones de GEI, mientras que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estimó que menos de 3% de las emisiones mundiales de GEI proceden de la producción de leche. Thoma *et al.* (2013) en sus estudios, encontraron que alrededor de 72% de las emisiones del sector lácteo ocurren previo a la salida de la leche de la Unidad de Producción de Leche (UPL). El objetivo de este capítulo es describir de manera general cómo interactúa el manejo del ganado lechero con las instalaciones lecheras en el modelo intensivo de producción de leche en la formación y emisión de GEI a la atmósfera. Adicionalmente, describir el papel que juega la maquinaria y los equipamientos que consumen energía y las estrategias que se aplican en ellos para mitigar la producción de GEI en explotaciones intensivas de producción de leche.

Generalidades del tipo de construcciones lecheras en México

La producción de leche en México procede de diversos modelos productivos, desde los más sencillos como el basado en pastoreo extensivo con producción estacional de leche (sólo en temporada de lluvias), pasando por la producción en trópico seco y húmedo tomando al pastoreo como base de la alimentación del ganado; y por último la producción lechera intensiva, que se lleva a cabo en las regiones áridas, semiáridas y templadas del país.

Esta diversidad de sistemas de producción muestra poblaciones variables de ganado en ordeño, desde pequeños productores (menos de 50 vacas) hasta grandes productores que manejan 3,000 o más vacas. Los sistemas de producción de leche que más aportan al mercado de la leche en México se encuentran principalmente en los estados del centro, centro-norte y norte del país, donde las condiciones climáticas varían desde templado subhúmedo hasta el cálido seco durante primavera-verano y muy frío en invierno (García, 1981). Estas condiciones climáticas determinan en gran medida las decisiones en cuanto al diseño y materiales a emplear en la construcción de sus instalaciones y también en las rutinas de limpieza, acondicionamiento de alojamientos y manejo general del ganado.

El caso de la limpieza de corrales en la ganadería lechera a gran escala representa todo un reto, ya que el tipo y material con que se construyen los pisos de todas las áreas impacta fuertemente en la funcionalidad y economía de la UPL. Entre más seca sea la región, la decisión para seleccionar el tipo de piso más adecuado para los alojamientos se inclina a favor del piso de tierra, con asignaciones de espacio que van desde 25 m² a 40 m² por vaca. Esto ayuda mucho a la dispersión de las deyecciones y con temperatura ambiental muy alta (más de 40°C); éstas se deshidratan rápidamente permitiendo el manejo en forma sólida. Cuando el estiércol se maneja sólido, disminuye la frecuencia con que debe ser removido. Sin embargo, es necesario planear la limpieza de todos los corrales de la UPL por lo menos un par de meses antes de que se establezcan las lluvias.

En UPL con medianas a pequeñas poblaciones de ganado, las construcciones y su tecnificación son muy diversas debido al nivel de inversión que se requiere. Independientemente del tamaño del hato, en zonas con clima templado (centro del país) y que tienen una precipitación pluvial de alrededor de 500 mm anuales (o más), la decisión en relación al tipo de piso, material de construcción a usar y el manejo de la limpieza, cambian radicalmente. Para estos casos, la limpieza de corrales se complica notablemente, ya que en estos lugares se construyen corrales con piso de concreto, y el espacio que se les otorga a las vacas se reduce demasiado (de 10 a 20 m²/ cabeza), lo que obliga a incrementar la frecuencia en la limpieza de corrales, complicándose fuertemente el almacenamiento y disposición final del estiércol.

Las instalaciones lecheras

Las instalaciones pecuarias, particularmente las destinadas para alojar al ganado lechero, tienen como principal objetivo brindar comodidad, bienestar y seguridad a éste, pero también al personal que labora en la UPL. Las instalaciones pecuarias deben, además, facilitar todas las actividades de atención al ganado y que su construcción implique un costo razonablemente bajo. La mayoría de las construcciones bien diseñadas y existentes desde hace varias décadas, si bien tomaron en cuenta los objetivos mencionados, no incorporaron el condicionante para producir con el menor impacto ambiental, lo que hoy en día es obligatorio tomar en cuenta. A pesar de esta omisión, hay ganaderías que están haciendo esfuerzos importantes para incorporar tecnología o modificar criterios de manejo en su ganado y eventualmente hacer adecuaciones a sus construcciones para cumplir con la responsabilidad de proteger el medio ambiente, reduciendo la producción y emisión de contaminantes y gestionando responsablemente los desechos de la UPL.

En la ganadería lechera, las fuentes comunes de emisión de GEI se pueden considerar como directas, que son aquellas producto de procesos biológicos como la respiración y la digestión, en este caso el dióxido de carbono (CO₂) y el CH₄. El CO₂ no tiene mayor relevancia por razones obvias, pero el metano sí, dado su potencial de calentamiento global por las emisiones producidas durante la fermentación entérica, y éstas son la principal fuente de contaminación atmosférica de las UPL. Las otras fuentes de emisión se consideran como indirectas, ya que dependen del manejo o gestión de las deyecciones del ganado (disposición o almacenamiento), de lo cual se hablará más adelante.

Orientación de las construcciones

En la planeación o adecuación de los alojamientos, la orientación de éstos es muy importante. Se recomienda hacerla de norte a sur (para el hemisferio norte), ya que de esta manera se puede permitir una excelente ventilación natural, con lo que se promueve la depuración del aire en los corrales en todo momento. Se recomienda que la velocidad de circulación del aire en corrales sea de 61 a 122 m/minuto y que se desplace a una altura de 51 cm a 76 cm por encima de la base del echadero, así el aire llegará a las vacas disipando el calor y los gases que se produzcan. La orientación de los alojamientos cumple varias funciones: una es obtener una excelente ventilación

Hay ganaderías lecheras haciendo esfuerzos importantes para incorporar tecnología y modificar criterios de manejo en su ganado haciendo adecuaciones a sus construcciones para cumplir con la responsabilidad de proteger el medio ambiente, reduciendo la producción y emisión de contaminantes y gestionando responsablemente los desechos de la unidad productiva

natural aprovechando los vientos dominantes cómo ya se mencionó, pero además promover el bienestar de las vacas con la reducción del uso de energía para proveerlo (uso de ventiladores y rociadores); otras funciones que se ven beneficiadas son la correcta iluminación y control de la temperatura de los alojamientos.

La disponibilidad de una buena iluminación natural disminuirá ampliamente la necesidad de recurrir a la iluminación artificial en horario diurno, lo que reduce el consumo de energía eléctrica. Cuando la orientación de las construcciones se hace siguiendo de manera ventajosa la dirección de la radiación solar, se obtiene, además de los efectos benéficos de la iluminación, la protección del ganado de un sobrecalentamiento (estrés por calor).

Para algunas UPL, esta orientación puede ayudar a mantener en un nivel bajo la humedad de los alojamientos (camas y pisos); entre mayor humedad en el interior de los alojamientos, mayor producción de CH_4 , N_2O , amoníaco (NH_3) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). En resumen, la orientación de las construcciones tiene un gran impacto en el confort del ganado, indudablemente; pero, además, hay que valorar su contribución a mitigar la producción y emisión de GEI a la atmósfera.

Manejo de corrales y gestión del estiércol

El manejo de corrales, en parte se refiere a como se agrupan las vacas en los mismos, lo que se conoce como carga

animal y que se refiere al número de cabezas alojadas con respecto al número de espacios de echaderos o camas disponibles para su descanso. Actualmente se ha visto una creciente tendencia a sobrepoblar los corrales, esto es, agrupar vacas en un número mayor a los espacios de descanso disponibles, lo que extrema el aprovechamiento del corral, reduciendo su tiempo de amortización, aunque disminuye la producción de leche por vaca y su bienestar, pero la producción por corral se incrementa.

Esta práctica tiene como desventaja la reducción del confort y arriesgar la salud de las vacas, ya que se incrementa la competencia por los recursos del corral (comedero, bebedero y por supuesto el espacio de descanso). El deterioro de la salud del hato está ligado a la dificultad para mantener un alto nivel de higiene en los espacios que ocupan las vacas; ello obliga a remover con mayor frecuencia las excretas, que se incrementan con este manejo. Es necesario tener en cuenta que, con la intensificación de la producción lechera, los corrales se convierten en una fuente importante de NH_3 y CH_4 (Drewry *et al.*, 2018; Owen y Silver, 2015).

Las emisiones de GEI por los animales en confinamiento, varían de acuerdo con el tipo de manejo que reciban las excretas y el material y mantenimiento de las camas o echaderos. El diseño de los corrales en las UPL modernas por lo general incluye echaderos individuales a libre acceso y camas “abiertas” de uso colectivo, que incluyen materiales como arena, paja, esquilmos agrícolas y hasta el uso del



propio estiércol seco de las vacas, (Almeida *et al.*, 2022; Jeppsson, 1999). Cuando la decisión es usar camas orgánicas y específicamente el estiércol, éste debe someterse a un tratamiento de composteo y desinfección previa a su colocación en las áreas de descanso. De manera obligada, a las camas orgánicas se les debe dar mantenimiento, que incluye la reposición del material que se pierde por su uso y además hay que descompactar la superficie de las camas con la periodicidad que se requiera. Esto permitirá que se mantengan con la menor humedad posible.

En los corrales donde se construyeron cubículos individuales de acceso libre, comunmente el estiércol se acumula en los pisos de los pasillos del corral, por lo que se recomienda remover mínimo una vez al día con escropa o con lavado por golpe de agua; se sugiere que cuando la carga de estiércol sea mucha (por alta carga animal), se establezcan dos o tres periodos de limpieza, para lo cual se puede aprovechar el momento en que las vacas están fuera del corral para ser ordeñadas (Hauge *et al.*, 2012; Somers *et al.*, 2005). Con una frecuente y rápida remoción del estiércol, el CH₄ y el N₂O no tienen suficiente tiempo para formarse y así las emisiones de estos gases se reducen.

Para la remoción eficiente del estiércol de los corrales, es crucial contar con un buen sistema de drenaje, por lo que en la planeación se debe calcular correctamente el volumen a movilizar y así evitar saturación de tuberías o cañerías y encharcamientos en los pisos del corral y en los pasillos (dentro y fuera del corral). El estancamiento de desechos, además de provocar un incremento en las emisiones, deteriora la calidad del ambiente en los alojamientos por acumulación de NH₃ y de H₂S.

La gestión del estiércol tiene gran importancia para las emisiones de GEI, y pueden variar desde 10% a 20% del total emitido. Esta variación depende de cómo es manejado el estiércol antes de ser incorporado al suelo como materia orgánica. Las emisiones de GEI por el manejo del estiércol están representadas por N₂O, que es el más potente generador de calentamiento atmosférico, el CH₄, que además de producirse durante la fermentación entérica, también se continúa produciendo en el estiércol cuando está bajo condiciones de alta humedad. De acuerdo con los resultados reportados por Holtshausen *et al.* (2021), midiendo la producción de gases encontraron que el CH₄ representó de 35% a 55% de todas las emisiones de GEI, junto con el NH₄ y el H₂S, que también se producen por el proceso de degradación microbiana del estiércol (Adviento-Borbe *et al.*, 2010).

Vale la pena mencionar que la principal afectación de estos últimos gases es la irritación del tracto respiratorio, tanto en el ganado como en el personal que labora en esos espacios. La cantidad que se produce de todos estos gases puede variar en función al manejo del estiércol, es decir, la manera en que es almacenado y posteriormente depositado en el suelo como abono. No obstante, hay que recordar que en primer lugar de importancia están las emisiones producidas por la fermentación entérica, que representan 44% del total del sector lechero, lo que equivale a 4.5 gigatoneladas de CO₂e o 132 a 390 g/cabeza⁻¹/día⁻¹ (Cortus *et al.*, 2015; Joo *et al.*, 2015; Monteny *et al.*, 2001; Schmithausen *et al.*, 2018).

La segunda fuente de contaminación está ligada a la producción de alimentos que componen las dietas de las vacas lecheras. Esta fuente contribuye con 41% del total de las emisiones de GEI (3.3 gigatoneladas de CO₂e). Finalmente en ganadería lechera está el consumo de energía, que se calcula que puede variar de 5% a 10% del total de todas las emisiones del sector.

Zonificación y circulación en la UPL

La zonificación se refiere a la ubicación de cada una de las áreas que integran la UPL, como son la de alojamientos del ganado, la de ordeño, la de almacenamiento de alimentos, de pasillos, callejones y andadores para la circulación de ganado y maquinaria, y finalmente, donde se almacena el estiércol antes de que salga de los establos. Es de suma importancia que estas áreas estén bien distribuidas y que se conecten de manera eficiente entre ellas. Esto ayudará a mejorar la circulación principalmente del ganado (para el ordeño u otros manejos), y para los vehículos y maquinaria que también circulan frecuentemente (alimentación y limpieza de corrales). La circulación es un punto de conflicto en muchas unidades de producción, el descuido de ésta provocará invariablemente retrasos importantes en actividades críticas.

Cuando las conexiones entre zonas son razonablemente cortas, el gasto energético de la maquinaria se reduce de manera importante a mediano y largo plazos y con la consecuente disminución del tiempo destinado a esas actividades. En la planeación y construcción de pasillos para el tránsito de las vacas a la zona de ordeño, se debe priorizar que la distancia a recorrer sea lo más corta posible; además, el ancho de los pasillos es fundamental considerarlo, ya que acelera esta movilización. Como regla general, no se recomienda construir pasillos de menos

de cinco metros de ancho. Hay que recordar que también circulan vehículos y maquinaria. Para corrales con hasta cien vacas, los pasillos de cinco metros de ancho son adecuados. Cuando los corrales alojan más de cien vacas, entonces se sugiere incrementar el ancho del pasillo 0.5 metros por cada cincuenta vacas más.

Lo anterior seguramente agilizará la movilización del ganado, asegurando que la sala de ordeño no parará en espera de la llegada del siguiente grupo. Tiempos muy largos en las movilizaciones del ganado hacen los jornales del personal asignado al ordeño muy largos y tediosos y con el consecuente incremento en el consumo de energía del equipo de ordeño, lo que se añade a las mermas en la producción de leche por el mayor tiempo que las vacas pasan fuera de su corral (sin acceso a los servicios de agua, alimento y descanso que éste provee).

Uso eficiente de la energía en alojamientos, maquinaria y equipos en la UPL

El sector lechero, y particularmente en ganadería intensiva a gran escala, consume grandes cantidades de energía en toda su cadena de producción. Por ejemplo, para la climatización, ventilación, iluminación, operación de vehículos motorizados, la maquinaria y equipos que se emplean para la obtención y almacenamiento de la leche, la energía que se usa en talleres, almacenes, oficinas y otros espacios con gastos energéticos de menor importancia. Cuando se obtiene la energía eléctrica de la red pública, hay que tomar en cuenta que para producirla se recurre en un alto porcentaje a la quema de combustibles fósiles (combustóleo), lo cual contribuye a incrementar la huella de carbono de la leche.

Actualmente, en ganaderías de mediana a gran escala, se están instalando equipamientos que permiten mejorar el uso de la energía eléctrica en la UPL. Tal es el caso de los preenfriadores de leche, que disminuyen el trabajo del sistema de refrigeración de la leche, los tanques para recuperar calor, en los que la tubería que conduce el gas refrigerante caliente, pasa en forma de serpentín por un depósito con agua que retiene el calor y con esto se reduce el tiempo de trabajo del difusor del tanque de enfriamiento, resultando en ahorro de energía eléctrica.

El agua precalentada de esta manera, por lo general se utiliza para el lavado del equipo de ordeño; sólo si es necesario incrementar la temperatura del agua para lavado, se puede usar un calentador de agua a gas LP o boiler eléctrico, lo que convenga. También en este punto

se puede mencionar la instalación de calentadores de agua solares, los cuales tienen una capacidad que se puede adaptar al gasto particular de la UPL, y de igual manera si el agua que se obtenga no tiene la temperatura deseada, el gasto energético para llevarla a la óptima será notablemente inferior.

Otras estrategias para hacer uso racional de la energía y que requieren de una mayor inversión, son los sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaica con paneles de celdas solares. Esta tecnología cada vez está siendo más aceptada por los productores, ya que la instalación de los paneles se puede hacer sobre los techos de las edificaciones, sin causar conflicto en el uso del espacio útil, además, con base en las recomendaciones que ofrecen los proveedores se menciona una vida útil de hasta veinte años. Para obtener los mejores resultados, se recomienda orientar adecuadamente los paneles solares para que reciban la mayor cantidad de radiación solar durante el mayor tiempo del día.

Otra tecnología aplicable para la obtención de energía es la llamada “triple gana gana”, que consiste en la instalación de biodigestores anaerobios motogeneradores. Éstos generan electricidad, calor y proporcionan un fertilizante natural producto de los materiales digeridos y que pueden reemplazar a los fertilizantes químicos por bioles. La digestión anaeróbica se realiza a través de degradar la materia orgánica por microorganismos anaerobios. Los materiales que se pueden añadir a estos biodigestores van desde el estiércol, residuos de cosechas forrajeras, desperdicio de alimento y hasta aguas residuales. Los biodigestores anaerobios como planta de degradación generan un ingreso o por lo menos ahorra dinero de la siguiente forma: reducen el gasto en energía eléctrica, o mejor aún, puede generar utilidades dependiendo de su producción, generación de calor para usos diversos (por ejemplo, calentar agua o alojamientos); también permiten ahorros por la reducción en el uso de fertilizantes químicos.

Si el manejo de las fuentes de desecho es aprovechado racionalmente y se lograra además algún incentivo gubernamental, también se pueden tomar como un ingreso adicional o ahorro en costos. Si se planea instalar un biodigestor, se recomienda ampliamente buscar asesoría de expertos en la materia, quienes pueden orientar en la decisión con base a un análisis de costo beneficio, que incluye la zonificación para la construcción, el tipo de materiales a usar, la capacidad requerida y finalmente la producción de energía esperada.

Conclusiones

La ganadería lechera a nivel global ha mostrado en las últimas décadas avances tecnológicos en todas sus áreas (nutrición, genética, reproducción, salud animal, manejo de hato, etcétera). Estos avances han sido de manera expedita, lo cual demuestra la gran resiliencia de este sector productivo ante las problemáticas que se le presentan, y esto corresponde a la importante relevancia que la leche tiene en la nutrición humana, ya que prescindir de ella no es una opción.

La contribución de la lechería a la emisión de GEI a la atmósfera es inegable y su atención por parte de todos los que intervienen en ella (directa o indirectamente) es una obligación impostergable. Actualmente se pueden mencionar muchos avances tecnológicos que se han desarrollado y aplicado para mitigar los efectos adversos al medio ambiente que esta actividad tiene y que son dignos de mencionarse y de reconocerse. No obstante, hay mucho camino que recorrer para concretar la inclusión de la cultura de respeto al medio ambiente como una práctica obligada desde la planeación y operación de una UPL social y ecológicamente responsable.

Referencias

- Adviento-Borbe M. A. A.; Wheeler E. F.; Brown N. E.; Topper P. A.; Graves R. E. V.; Ishler A.; Varga G. A. 2010. Ammonia and Greenhouse Gas Flux from Manure in Freestall Barn with Dairy Cows on Precision Fed Rations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 53(4): 1251-1266
- Almeida, J.G.R.; Lorinquer, E.; Robin, P.; Ribeiro-Filho, H.M.N.; Edouard, N. 2022. Ammonia and Nitrous Oxide Emissions from Dairy Cows on Straw-Based Litter Systems. *Atmosphere*, 13, 283. <https://doi.org/10.3390/atmos13020283>
- Cortus, E. L., Jacobson, L. D., Hetchler, B. P., Heber, A. J., & Bogan, B. W. 2015. Methane and nitrous oxide analyzer comparison and emissions from dairy freestall barns with manure flushing and scraping. *Atmospheric Environment*, 100, 57e65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.039>
- Drewry, J. L., Choi, C. Y., Powell, J. M., & Luck, B. D. 2018. Computational model of methane and ammonia emissions from dairy barns: Development and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 80-89.
- García E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México (DF): Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.012>
- Hauge, S.J., Kielland, C., Ringdal, G., Skjerve, E., Nafstad, O., 2012. Factors associated with cattle cleanliness on Norwegian dairy farms. *J. Dairy Sci.* 95, 2485-2496.
- Holtshausen, L.; Benchaar, C.; Kröbel, R.; Beauchemin, K.A. Canola Meal versus Soybean Meal as Protein Supplements in the Diets of Lactating Dairy Cows Affects the Greenhouse Gas Intensity of Milk. *Animals* 2021, 11, 1636. [CrossRef]
- Jeppsson, K.-H. 1999. Volatilization of Ammonia in Deep-litter Systems with Different Bedding Materials for Young Cattle. *J. Agric. Eng. Res.* 73, 49-57.
- Joo, H. S., Ndegwa, P. M., Heber, A. J., Ni, J. Q., Bogan, B. W., Ramirez-Dorronso, (2015). Greenhouse gas emissions from naturally ventilated freestall dairy barns. *Atmospheric Environment*, 102, 384-392 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.067>
- Monteny, G. J., Groenestein, C. M., & Hilhorst, M. A. (2001). Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1-3), <https://doi.org/10.1023/A:1012602911339>
- Owen, J. J., & Silver, W. L. 2015. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: A review of field-based studies. *Global Change Biology*, 21, 550-565. <https://doi.org/10.1111/gcb.12687>
- Schmithausen, A. J., Schiefler, I., Trimborn, M., Gerlach, K., Sudekum, K. H., Pries, M., et al. 2018. Quantification of methane and ammonia emissions in a naturally ventilated barn by using defined criteria to calculate emission rates. *Animals*, 8(5), 14. <https://doi.org/10.3390/ani8050075>
- Smith, P., M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E. Elsidig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N. Ravindranath, C. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, and F. Tubiello. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Pages 811-922 in *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlemmer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J. C. Minx, ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Somers, J.G.C.J., Frankena, K., Noordhuizen-Stassen, E.N., Metz, J.H.M., (2005). Risk factors for digital dermatitis in dairy cows kept in cubicle houses in The Netherlands. *Prev. Vet. Med.* 71, 11-21.
- Thoma, G. J., J. S. Popp, D. W. Nutter, D. R. Shonnard, R. Ulrich, M. D. Matlock, D. Kim, Z. Neiderman, N. Kemper, C. East, and F. Adom. 2013. Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. *Int. Dairy J.* 31:S3-S14.

12

ALIMENTACIÓN Y EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO (GEI)

Luis Corona Gochi¹

¹Departamento de Nutrición Animal,
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



CEIECT-FMVZ-UNAM

El reto para los futuros profesionistas y ganaderos es que se tiene que aumentar la producción de leche, con las tres “s”, es decir, de manera segura, suficiente y sostenible

La elaboración de dietas de precisión para el ganado lechero que permitan una producción eficiente y sostenible en éste, son de las estrategias con mayor viabilidad y de aplicación práctica para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La utilización de aceites y grasas, semillas de oleaginosas, forrajes de mejor calidad, sistemas de pastoreo eficientes, procesamiento de alimentos, uso de aditivos en las dietas del ganado lechero son temas que serán abordados en este capítulo como estrategias de alimentación para disminuir los GEI.

Introducción

La alimentación del ganado tiene una relación directa sobre la emisión de GEI, ya sea sobre la emisión de metano entérico y óxido nitroso, como de secuestro de carbono en el forraje producido y en suelo, lo cual debe evaluarse a través de análisis de ciclo de vida. Es importante también comprender que las emisiones de metano (CH_4) por parte del ganado se expresan utilizando diferentes métricas, lo que permite evaluar su impacto ambiental y diseñar estrategias de mitigación. Lo recomendable es utilizar diferentes estrategias de mitigación de GEI, ya que la mayoría son aditivas, y que dichas estrategias sean sostenibles en los sistemas de producción.

El reto para los futuros profesionistas y ganaderos es que se tiene que aumentar la producción de leche con las tres “s”; es decir, de manera segura, suficiente y sostenible, lo cual representa un reto muy grande. Los principales gases de efecto invernadero producidos por el ganado lechero son metano (52%), óxido nitroso (27%) y dióxido de carbono

(21%). Por ello, las principales estrategias nutricionales de mitigación, se dirigen al CH_4 producido por fermentación entérica.

Formas de expresión de emisión de metano por el ganado

Antes de comenzar a revisar las estrategias nutricionales y de alimentación de ganado lechero disponibles para reducir la emisión de metano, es importante tener claro que las emisiones de CH_4 , se pueden expresar de diferente manera para poder interpretar el impacto de una estrategia de mitigación.

La **tasa de emisión** se refiere a la cantidad de metano emitida por un animal o grupo de animales en un período específico, generalmente expresada en gramos por día (g/día). La **intensidad de emisión** es la relación de la emisión de metano emitido respecto a la ganancia de peso o producción de leche. Los **factores de emisión** son coeficientes que estiman la cantidad de metano emitido por unidad de actividad; por ejemplo, por animal o por año. El **Ym** es el porcentaje de la energía bruta consumida que se pierde en forma de metano durante la fermentación entérica. La pérdida de energía que se pierde en forma de metano es del 2% al 12% de la energía bruta consumida. El **rendimiento de emisión** por kg de MS consumida evalúa la cantidad de metano emitido por unidad de alimento consumido, expresada en gramos de CH_4 por kilogramo de materia seca ingerida (g CH_4 /kg MS). El **rendimiento por unidad de área** evalúa la cantidad de metano por unidad de área de pastoreo, por ejemplo, por hectárea.

Dietas con mayor calidad nutricional y digestibilidad pueden reducir la producción de metano al mejorar la conversión alimenticia y disminuir el tiempo de retención de alimento en el rumen

Así entonces, la manera en que se evalúe la emisión de metano depende de cómo se expresa esa emisión, por lo que el eficientizar la producción lechera será una manera directa de disminuir la emisión de GEI (Vargas *et al.*, 2022; Hristov, 2024).

Estrategias de alimentación para reducir las emisiones de GEI

1. Mejora en la calidad y digestibilidad de la dieta

Dietas con mayor calidad nutricional y digestibilidad pueden reducir la producción de metano al mejorar la conversión alimenticia y disminuir el tiempo de retención de alimento en el rumen. Aumentar la cantidad de concentrado que se ofrece a las vacas lecheras y proporcionar forrajes de mejor calidad nutricional y digestibles, permitirá disminuir la emisión de metano y la intensidad de emisión de un 10 a 15% (Hristov *et al.*, 2024). Al aumentar la digestibilidad del forraje, se incrementará el consumo de materia seca y, por lo tanto, también la producción de leche, lo cual reduce el rendimiento y la intensidad de emisión de metano; es decir, disminuye la emisión de metano por kg de materia seca consumida y por kg de leche producida, respectivamente (Beauchemin *et al.*, 2022). La digestibilidad de los forrajes se mejora al cosecharlos en un estado fenológico adecuado o teniendo un manejo del pastoreo óptimo (Vargas *et al.*, 2022). Se ha propuesto una nueva estrategia de pastoreo llamado “rotatuino”, que busca combinar los beneficios del pastoreo rotacional intensivo con el pastoreo continuo, para mantener una estructura del pasto ideal que permita mayor consumo y calidad de la dieta. Así, esto reduce el rendimiento e intensidad de emisión de metano (Schons *et al.*, 2021; Zubieta *et al.*, 2021).

2. Uso de forrajes mejorados

La utilización de forrajes mejorados es una estrategia para mitigar las emisiones de metano entérico. La mejora en la calidad del forraje se obtiene al cosecharlo o pastorearlo en una edad óptima, mediante la selección de variedades con mayor digestibilidad, así como al tener un almacenamiento

adecuado. En general, los forrajes de mejor calidad contienen un mayor contenido de carbohidratos no estructurales (CNE) y menor contenido de fibra y lignina, lo que permite una menor producción de metano (Knapp *et al.*, 2014).

3. Uso de fuentes de lípidos

Usar estas fuentes en la dieta de los rumiantes es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de metano entérico. La adición de lípidos reduce la producción de metano a través de diferentes mecanismos, como la toxicidad contra arqueas metanógenas y protozoarios, los cuales están en simbiosis con las arqueas, mediante la biohidrogenación de ácidos grasos insaturados que actúan como un sumidero de hidrógeno, y la modificación de la fermentación ruminal, al incrementar la proporción molar de ácido propiónico, lo que provoca una disminución en la producción de metano (Beauchemin *et al.*, 2022; Vargas *et al.*, 2022).

Además, la adición de lípidos en la dieta reduce la digestión de la fibra al cubrirla, lo que disminuye la fermentación microbiana y la producción de metano (Machmüller, 2006). Los ácidos grasos poliinsaturados y de cadena media tienen efectos tóxicos y disruptivos en las membranas celulares de los metanógenos (Beauchemin *et al.*, 2022). La adición en la dieta de aceite de girasol y canola pueden reducir significativamente las emisiones de metano en vacas lecheras y otros rumiantes (Mata e Silva *et al.*, 2017; Avilés Nieto *et al.*, 2023). La adición de semilla de algodón redujo el rendimiento de la emisión de metano en 14% (Williams *et al.*, 2020). Sin embargo, la eficacia de la adición de fuentes de lípidos dependerá de la fuente y cantidad de grasa adicionada, así como de la composición de nutrientes, ácidos grasos y del uso de otros aditivos en la dieta.

4. Procesamiento de granos

El procesamiento de los granos permite reducir las emisiones de metano en rumiantes. Métodos de procesamiento, como el hojueleado al vapor y la reconstitución aumentan la

digestión del almidón y modifican la proporción acetato: propionato en el rumen (Corona *et al.*, 2006), lo que permite reducir el rendimiento de metano (Hales *et al.*, 2012).

5. Uso de aditivos en la dieta

Existen varios aditivos que se utilizan para reducir las emisiones de metano en rumiantes (cuadro 1), como:

3-Nitrooxypropanol (3NOP): este inhibidor de metano reduce las emisiones de metano en promedio en 30% en vacas lecheras (Dijkstra *et al.*, 2018) sin efectos adversos en la producción de leche (Kebraeb *et al.*, 2023).

Microorganismos de alimentación directa (DFM): estos aditivos biológicos alteran la estructura microbiana del rumen, reduciendo la metanogénesis. Sin embargo, la respuesta es muy variable dependiendo del tipo de probiótico (Ncho *et al.*, 2024).

Ionóforos: mejoran la eficiencia energética y reducen el metano (Beauchemin *et al.*, 2020). Guan *et al.* (2006) observaron reducciones del 27-30% en las primeras 4 semanas del uso de monensina. Sin embargo, los efectos disminuyen con el tiempo por adaptación microbiana parti-

cularmente de protozoarios ciliados. Odongo *et al.* (2007) observaron una reducción sostenida del 7% de metano (g/d) en vacas lecheras tras 6 meses de complementación con monensina (24mg Rumensin/kg MS).

Algas rojas: las algas, especialmente las macroalgas rojas como *Asparagopsis taxiformis*, han demostrado ser altamente efectivas en la reducción de emisiones de metano en rumiantes. Estudios han mostrado que la inclusión de *Asparagopsis* spp. en la dieta puede reducir las emisiones de metano en más del 80% en ganado de carne y hasta un 98% en algunos casos, con sólo 0.2% en la dieta. Estas algas contienen compuestos halogenados, como el bromoformo, que interfieren en la última etapa de la metanogénesis en los arqueas metanogénicas, inhibiendo la enzima metil coenzima M reductasa (Kinley *et al.*, 2020; Roque *et al.*, 2021). No afecta la producción de leche, ni la salud de los animales. Recientemente, se ha evaluado un aditivo que contiene bromoformo sintético (Rumin8 Pty Ltd. West Perth, WA, Australia) en novillos Angus y redujo en 95% la producción total, rendimiento e intensidad de emisión de metano sin afectar los parámetros de producción de los animales (Kelly *et al.*, 2025). Lo que resolvería el problema de cosecha de alga silvestre o producción de ésta a gran escala.

Cuadro 1. Efecto de aditivos en la emisión de metano en ganado lechero

Aditivo	Dosis	Mecanismo de Acción	% Reducción de Metano	Referencia
3-Nitrooxypropanol (3NOP)	1-2 g/día por animal	Inhibe la enzima metil-coenzima M reductasa, crucial en la última etapa de la metanogénesis.	Hasta 30%	Dijkstra <i>et al.</i> , 2018); Kebraeb <i>et al.</i> , 2023
Macro algas (Asparagopsis)	0.5-2% de la MS	Contienen compuestos halogenados que interfieren en la producción de metano.	50-80%	Kinley <i>et al.</i> , 2020; Roque <i>et al.</i> , 2021
Bromoformo sintético. Rumin8 oil IVP	32mg/kg MS	Contienen compuestos halogenados que interfieren en la producción de metano	95%	Kelly <i>et al.</i> , 2025
Aceites vegetales	3-6% de la MS	Alteran la fermentación ruminal, reduciendo la producción de metano.	26%	Beauchemin <i>et al.</i> , 2020
Ionóforos	100-300 mg/día	Mejoran la eficiencia del metabolismo energético y alteran las vías metabólicas.	7 – 30%	Guan <i>et al.</i> , 2006; Odongo <i>et al.</i> , 2007
Microorganismos de alimentación directa (DFM)	Variable según producto	Compiten con los metanógenos por el hidrógeno, promoviendo vías alternativas.		Ncho <i>et al.</i> , 2024





Un desequilibrio entre proteína y energía en la dieta produce una ineficiente utilización del nitrógeno dietario, lo que ocasiona mayores pérdidas de nitrógeno en la orina y heces, incrementando la potencial emisión de óxido nitroso, poderoso GEI

6. Taninos y saponinas

Los taninos y las saponinas (cuadro 2) son metabolitos secundarios de las plantas que han demostrado ser efectivos en la reducción de las emisiones de metano en ganado lechero. Los taninos, que son compuestos polifenólicos, pueden reducir la producción de metano al inhibir directamente algunos metanógenos y al disminuir el número de protozoos en el rumen, los cuales albergan simbióticamente a los metanógenos (Beauchemin *et al.*, 2020). Las saponinas, por otro lado, pueden reducir las emisiones de metano al alterar la población microbiana en el rumen, lo que afecta la producción de metano (Mao *et al.*, 2010).

Ambos compuestos han sido evaluados por su potencial antimetanogénico, y se ha observado que pueden disminuir significativamente la producción de metano en rumiantes. Los taninos, como los extraídos de quebracho, mimosa y castaño, han mostrado reducir la producción de metano entre un 6% y un 40% en estudios *in vitro*. La efectividad depende de la concentración y el tipo de tanino. Las saponinas, como las de *Yucca schidigera*, también han demostrado reducir las emisiones de metano en un rango similar, aunque su efectividad puede variar dependiendo de la concentración y la fuente (Min *et al.*, 2020).

Algunas plantas como el pasto limón (*Cymbopogon citratus*), que es un pasto perenne cultivado en regiones tropicales y subtropicales de Asia, América y África, contiene compuestos bioactivos como fenoles, saponinas, taninos y flavonoides, y se ha encontrado que reduce el rendimiento de emisión de metano en 22% en bovinos con una dosis de 30 g de MS/día en bovinos (Vázquez-Carrillo *et al.*, 2023). En un estudio *in vitro* utilizando un producto comercial a base de quebracho, que contenía 100mg/g de fenoles totales y 50 mg/g de taninos condensados, se observó que con una dosis de 0.75% de producto comercial, disminuyó el metano 30% con una dieta basada en forraje (Jiménez-Arévalo *et al.*, 2023).

7. Aceites esenciales

Los aceites esenciales (cuadro 3) han sido estudiados por su potencial para reducir las emisiones de metano en rumiantes. Aceites esenciales de orégano, tomillo, ajo y eucalipto han mostrado una reducción significativa en la producción de metano en estudios *in vitro*. Por ejemplo, el aceite de orégano ha demostrado una reducción de 87% en la producción de metano en condiciones de laboratorio (Tseten *et al.*, 2020). Sin embargo, los resultados

de los estudios *in vivo* han sido menos contundentes y la efectividad puede variar dependiendo de la composición específica del aceite y las condiciones de alimentación (Beauchemin *et al.*, 2022). Además, el ajo ha mostrado una reducción de 91% en la producción de metano en estudios *in vitro*, y el tomillo ha logrado una reducción del 30% (Tseten *et al.*, 2020).

8. Optimización del balance energético y de proteínas

La optimización del balance de energía y proteína en la dieta del ganado lechero permite reducir las emisiones de óxido nitroso (N_2O). El exceso de proteína en la dieta producirá un mayor contenido de nitrógeno en las excretas. El óxido nitroso (N_2O) es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 298 veces mayor que el CO_2 . En los sistemas ganaderos lecheros, la principal fuente de N_2O es la excreta del ganado, especialmente la orina rica en nitrógeno. El exceso de nitrógeno en la dieta, en forma de proteína cruda, se excreta como urea, que posteriormente se convierte en N_2O mediante procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo. Un desequilibrio entre proteína y energía en la dieta produce una ineficiente utilización del nitrógeno dietario. Lo que ocasiona mayores pérdidas de nitrógeno en la orina y heces, incrementando la potencial emisión de N_2O . Por lo tanto, optimizar este balance puede mejorar la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUN) y disminuir la emisión de N_2O . La reducción de proteína cruda de 17% al 15% en dietas para vacas lecheras, y ajustando la energía neta de lactancia, redujo significativamente el nitrógeno urinario sin afectar el consumo de materia seca, producción de leche, rendimiento de grasa y proteína (Lavery *et al.*, 2025). Huhtanen y Hristov (2009) mostraron que una mejor eficiencia en la utilización de nitrógeno (EUN) se asocia con menor emisión de N_2O a través de menor contenido de urea en la orina.

Conclusión

La optimización de la alimentación es una estrategia clave para reducir las emisiones de GEI de la ganadería lechera. Estrategias para mejorar la digestibilidad del alimento, el uso de aditivos, la inclusión de grasas y aceites y mejorar el balance energía:nitrógeno, pueden disminuir significativamente la huella de carbono del sector lechero sin afectar la producción.

Cuadro 2. Efecto de los taninos y las saponinas en la reducción de metano en ganado lechero

Compuesto	Fuente	Dosis	% Reducción de Metano	Referencia
Taninos	Quebracho, Mimosa, Castaño	1-2 mg/ml	6-40%	Min <i>et al.</i> , 2020
Saponinas	Yucca schidigera	Variable según estudio	6-40%	Min <i>et al.</i> , 2020
Fenoles, saponinas, flavonoides	Cymbopogon citratus	30g MS/d	22%	Vázquez-Carrillo <i>et al.</i> , 2023
Taninos	Fuente de Quebracho-Protein Enhancer®	0.75% (50mg/g de taninos condensados)	30%	Jiménez-Arévalo <i>et al.</i> , 2024

Cuadro 3. Efecto de algunos aceites esenciales en la reducción de metano en dietas para ganado lechero

Aceite Esencial	Fuente	Tipo de Estudio	% Reducción de Metano	Referencia
Orégano	<i>Origanum vulgare</i>	<i>In vitro</i>	Hasta 87%	Patra <i>et al.</i> , 2012
Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>In vitro</i>	Más del 20%	Roy <i>et al.</i> , 2024
Ajo	<i>Allium sativum</i>	<i>In vitro</i>	Hasta 91%	Siliva, 2011 Molho-Ortiz, <i>et al.</i> , 2022
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>In vitro</i>	Hasta 85%	Wang <i>et al.</i> , 2018
Canela	<i>Cinnamon verum</i>	<i>In vitro</i>	Hasta 82%	Molho-Ortiz, <i>et al.</i> , 2022
Lavanda	<i>Lavandula spp.</i>	<i>In vitro</i>	Hasta 60%	Ozkan <i>et al.</i> , 2015

Referencias

- Avilés-Nieto, J.N., Márquez-Mota, C.C., Hernández-Medrano, J.H., Ramírez-Bribiesca, J.E., Castillo-Gallegos, E., Plascencia, A., Castrejón-Pineda, F.A., Corona, L. (2023). Effect of canola oil supplementation level on total tract digestion, ruminal fermentation and methane emissions of cows grazing *Urochloa* sp supplemented with a fixed amount of concentrate. *Tropical Animal Health and Production*. 55: 77,1-10. Electronic ISSN 1573-7438. Print ISSN 0049-4747. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03485-8>
- Beauchemin, Karen A. et al. (2022). Invited review: Current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*, Volume 105, Issue 12, 9297 – 9326. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>
- Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Eckard, R. J., & Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 14(s1), s2-s16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>
- Corona L., S. Rodríguez, R.A. Ware and R.A. Zinn. (2005). Comparative effect of whole, ground, dry-rolled and steam-flaked corn on digestion and performance in feedlot cattle. *Professional Animal Scientist*. 21: 200-206.. [https://doi.org/10.15232/s1080-7446\(15\)31203-1](https://doi.org/10.15232/s1080-7446(15)31203-1)
- Dijkstra, J., A. Bannink, J. France, E. Kebreab, and S. van Gastelen. (2018). Short communication: Anti-methanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *J. Dairy Sci.* 101:9041-9047. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14456>
- Guan, K. M. Wittenberg, K. H. Ominski, D. O. Krause. (2006). Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane, *Journal of Animal Science*, Volume 84, Issue 7, July, Pages 1896-1906, <https://doi.org/10.2527/jas.2005-652>
- Hales, K.E., Cole, N. A. and J. C. MacDonald, Effects of corn processing method and dietary inclusion of wet distillers grains with solubles on energy metabolism, carbon–nitrogen balance, and methane emissions of cattle,, *Journal of Animal Science*, Volume 90, Issue 9, September 2012, Pages 3174–3185, <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4441>
- Hristov, A.N. (2024). Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions. *Journal of Dairy Science*, Volume 107, Issue 7, 4129 – 4146. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>
- Huhtanen P. and A.N. Hristov. (2009). A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, Volume 92, Issue 7, Pages 3222-3232, ISSN 0022-0302, <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1352>
- Jiménez-Arévalo V. G.2, Romero-Pérez A., Talamante-Gomez J., Márquez-Mota C., Vazquez-Carrillo M. F., Corona-Gochi L*. (2024). Effect of tannins level and diet type on in vitro ruminal fermentation and methane production. ASAS-CSASA-WSASAS Annual Meeting. Calgary. Alberta, Canada. July 21-25, 2024. *Journal of Animal Science*, Volume 102, Issue Supplement 3, September, Pages 786-787. <https://doi.org/10.1093/jas/skae234.885>
- Kebreab, E., et al. (2023). A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, Volume 106, Issue 2, 927 – 936. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22211>
- Kelly, Leanna, Eleanor May Pressman, John-Fredy Ramirez-Agudelo, Hannah Chernavsky, Pablo Alvarez-Hess, Silke Jacques, Matthias Hess, Ermias Kebreab (2025). The effect of Rumin8 Investigational Veterinary Product – a bromoform based feed additive – on enteric methane emissions, animal production parameters, and the rumen environment in feedlot cattle, *Translational Animal Science*, 2025;, txaf028, <https://doi.org/10.1093/tas/txaf028>
- Kinley, Robert D., Gonzalo Martinez-Fernandez, Melissa K. Matthews, Rocky de Nys, Marie Magnusson, Nigel W. Tomkins. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, Volume 259, 120836, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- Lavery, A., A. Craig, A.W. Gordon, A. White, N. Barkley, C.P. Ferris. (2025). Reducing dietary crude protein levels while meeting metabolizable protein requirements: Performance of dairy cows over a full lactation period, *Journal of Dairy Science*, Volume 108, Issue 2, Pages 1451-1473, ISSN 0022-0302, <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25405>
- Machmüller, A. (2006). Medium-chain fatty acids and their potential to reduce methanogenesis in domestic ruminants, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 112, Issues 2–3, 2006, Pages 107-114, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.010>.
- Mao, H. L., J. K. Wang, Y. Y. Zhou, and J. X. Liu. (2010). Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livest. Sci.* 129:56–62. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.12.011>
- Mata e Silva B. C., Lopes F. C. F., Pereira L. G. R., Tomich T. R., Morenz M. J. F., Martins C. E., Gomide C. A. M., Paciullo D. S. C., Maurício R. M., Chaves A. V. (2017) Effect of sunflower oil supplementation on methane emissions of dairy cows grazing *Urochloa brizantha* cv. marandu1. *Animal Production Science* 57, 1431-1436. <https://doi.org/10.1071/AN16470>
- Molho-Ortiz, Aarón Alejandro, Atmir Romero-Pérez, Efrén Ramírez-Bribiesca, Claudia Cecilia Márquez-Mota, Francisco Alejandro Castrejón-Pineda, Luis Corona. (2022). Effect of essential oils and aqueous extracts of plants on in vitro rumen fermentation and methane production. *J Anim Behav Biometrol.*, 10:2,1-10.2210. eISSN: 23 8-1265. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.22010>
- Min Byeng R., Sandra Solaiman, Heidi M. Waldrip, David Parker, Richard W. Todd, David Brauer. (2020). Dietary mitigation of enteric methane

emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options, *Animal Nutrition*, Volume 6, Issue 3, Pages 231-246, ISSN 2405-6545, <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.05.002>

Ncho, C.M., S-H. Kim, S.A. Rang, S.S. Lee. (2024) A meta-analysis of probiotic interventions to mitigate ruminal methane emissions in cattle: implications for sustainable livestock farming, *animal*, Volume 18, Issue 6, ,101180, ISSN 1751-7311, <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101180>

Odongo, N. E., Bagg, R., Vessie, G., Dick, P., Or-Rashid, M. M., Hook, S. E., Gray, J. T., Kebreab, E., France, J., & McBride, B. W. (2007). Long-term effects of feeding monensin on methane production in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 90(4), 1781-1788. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-708>

Ozkan CO, Kamalak A, Atalay AI, Tatliyer A, Kaya E. (2015). Effect of peppermint (*Mentha piperita*) essential oil on rumen microbial fermentation of barley grain. *J. Appl. Anim. Res.* 43: 287-290. <https://doi.org/10.1080/09712119.2014.963101>

Patra AK, Yu Z. (2012). Effects of essential oils on methane production and fermentation by, and abundance and diversity of, rumen microbial populations. *Appl. Environ. Microbiol.* 78: 4271-4280. <https://doi.org/10.1128/aem.00309-12>

Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis* spp.) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, 16(3), e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>

Roy D, Tomar SK, Sirohi SK, Kumar V, Kumar M. (2014). Efficacy of different essential oils in modulating rumen fermentation in vitro using buffalo rumen liquor. *Vet. World* 7: 213-218. <http://dx.doi.org/10.14202/vetworld.2014.213-218>

Schons, R.M.T., E.A. Laca, J.V. Savian, J.C. Mezzalira, E.A.N. Schneider, L.A.M. Caetano, A.S. Zubieta, M.A. Benvenuti, P.C.de.F. Carvalho. (2021). 'Rotatinuous' stocking: An innovation in grazing management to foster both herbage and animal production, *Livestock Science*, Volume 245, ,104406, ISSN 1871-1413, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104406>

Siliva CR, Amelchanka SL, Duval SM, Kreuzer M. (2011). Ruminant methane inhibition potential of various pure compounds in comparison with garlic oil as determined with a rumen simulation technique (Rusitec). *Br. J. Nutr.* 106: 114-122. <https://doi.org/10.1017/s0007114510005684>

Tseten T, Sanjorjo RA, Kwon M, Kim S. (2022) Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Animals. *J. Microbiol. Biotechnol.* 32:269-277. <https://doi.org/10.4014/jmb.2202.02019>

Vargas, J.; Ungerfeld, E.; Muñoz, C.; DiLorenzo, N. (2022). Feeding Strategies to Mitigate Enteric Methane Emission from Ruminants in Grassland Systems. *Animals*, 12, 1132. <https://doi.org/10.3390/ani12091132>

Vázquez-Carrillo, M.F.; Zaragoza-Guerrero, R.; Corona-Gochi, L.; González-Ronquillo, M.; Castillo-Gallegos, E.; Castelán-Ortega, O.A. (2023). Effect of *Cymbopogon citratus* on Enteric Methane Emission, Nutrients Digestibility, and Energy Partition in Growing Beef Cattle. *Agriculture*, 13(4), 1-15. 745. eISSN: 2077-0472 <https://doi.org/10.3390/agriculture13040745>

Williams, S. R. O., M. C. Hannah, R. J. Eckard, W. J. Wales, and P. J. Moate. (2020). Supplementing the diet of dairy cows with fat or tannin reduces methane yield, and additively when fed in combination. *Animal* 14(S3):s464-s472. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001032>

Wang B, Jia M, Fang L, Jiang L, Li Y. (2018). Effects of eucalyptus oil and anise oil supplementation on rumen fermentation characteristics, methane emission, and digestibility in sheep. *J. Anim. Sci.* 96: 3460-3470. <https://doi.org/10.1093/jas/sky216>

Zubieta, Sánchez Angel , Savian, Jean Victor; Filho, William de Souza, Osorio Wallau Marcelo , Marín Gómez, Alejandra, Bindelle, Jérôme, Bonnet Olivier François, Jean, de Faccio Carvalho Paulo César. (2021). Does grazing management provide opportunities to mitigate methane emissions by ruminants in pastoral ecosystems?. *Science of The Total Environment*, Volume 754, 142029, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142029>

POTENCIAL DE SUPLEMENTOS Y ADITIVOS PARA LA REDUCCIÓN DE METANO EN BOVINOS

Juan Carlos Ku Vera¹

María Denisse Montoya Flores²

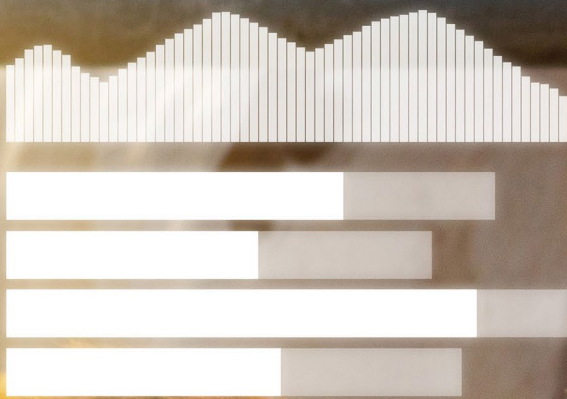
Rafael Jiménez Ocampo³

Andrés Cadenas Soberanis¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,
Campo Experimental Valle del Guadiana, Durango



Los mecanismos para reducir la síntesis de metano en el rumen son bien conocidos, siendo los tres principales: 1) redireccionando el hidrógeno (precursor del metano) a otras vías bioquímicas alternas a la metanogénesis; 2) modificando el patrón de fermentación ruminal, y 3) afección a las arqueas metanogénicas

Se estima que en 2023 la población de ganado bovino de leche en México era de 2,713,534 cabezas con hatos lecheros considerables en estados como Coahuila, Durango, Jalisco y Chihuahua. En la actualidad, se tiene la expectativa a nivel federal por parte de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de incrementar la producción de leche en la región tropical del país para aumentar el suministro del lácteo para el Programa de Abasto Social de LICONSA. Una de las opciones para elevar la producción de leche es aumentar la eficiencia energética de las vacas en los diferentes sistemas de producción lechera. Una vez que el alimento (energía bruta) es consumido por la vaca lechera, se originan pérdidas de la energía alimentaria que están contenidas en las heces (alimento no digerido), en la orina (compuestos nitrogenados), en los gases eructados (metano) y en el calor disipado (incremento calórico).

La síntesis de metano en el rumen representa una pérdida de energía de entre 2% y 12% de la energía bruta consumida por la vaca (Johnson y Johnson, 1995). En la actualidad, se están realizando esfuerzos importantes para desarrollar aditivos que puedan reducir la producción de metano (Belanche *et al.*, 2025; Hristov *et al.*, 2025;). Sin embargo, la disponibilidad comercial de aditivos antimetanogénicos en sistemas de producción lechera es limitada. En México, los únicos aditivos de este tipo disponibles comercialmente son la monensina y el 3-nitrooxypropanol.

Los mecanismos para reducir la síntesis de metano en el rumen son bien conocidos, siendo los tres principales: 1) redireccionando el hidrógeno (precursor del metano)

a otras vías bioquímicas alternas a la metanogénesis; 2) modificando el patrón de fermentación ruminal, y 3) afección a las arqueas metanogénicas. A continuación, se describen ejemplos de cada mecanismo.

1. Compuesto que redirecciona el hidrógeno

El nitrato (NO_3) es un compuesto nitrogenado que se encuentra en la naturaleza y en productos industriales, principalmente en fertilizantes para la agricultura. Se ha venido implementando en la alimentación de rumiantes como una alternativa para disminuir la emisión de metano entérico (CH_4). El NO_3 se suministra al ganado en forma de sales (nitrato de calcio y nitrato de amonio) que presentan una alta solubilidad a nivel ruminal. De igual manera, aporta nitrógeno no proteico que es requerido para la síntesis de proteína microbiana. Sin embargo, su uso es limitado debido a que puede resultar tóxico para los animales, comprometiendo su salud y bienestar. Recientemente, se ha evaluado el nitrato de liberación lenta en el rumen para disminuir el riesgo de intoxicación por nitrito (NO_2). La suplementación con nitrato puede reemplazar la adición de urea en la dieta, ya que, además de aportar nitrógeno fermentable a los microorganismos del rumen, también promueve una disminución del CH_4 .

Teóricamente, la reducción de nitrato a amoníaco (NH_3) debería disminuir la producción de metano en 25.8 g/100 g de NO_3 (Van Zijderveld *et al.*, 2010). Sin embargo, se ha demostrado en numerosos estudios que existe variación y la eficiencia de la reducción de NO_2 a NH_3 no es 100% eficiente. Hegarty *et al.* (2021) describen a este aditivo

como una estrategia para reducir $\leq 5\%$ la producción de CH_4 entérico.

El nitrato ha demostrado ser un fuerte aceptor de electrones en el rumen cuando se reduce a NO_2 y, posteriormente a NH_3 , disminuyendo la formación de CH_4 . Las dosis empleadas van del 1% al 2% del consumo de materia seca. Es importante señalar que los microorganismos ruminales reducen de manera eficiente el NO_3 a NO_2 , pero la conversión posterior a NH_3 ocurre a una tasa más lenta, provocando acumulación de NO_2 en el rumen que, de ser absorbido al torrente sanguíneo, podría provocar metahemoglobinemia, comprometiendo la salud animal (Newbold *et al.*, 2014). La dosis puede ser mayor cuando los animales están adaptados al consumo de NO_3 , pero hay animales susceptibles a intoxicación.

El nitrato de calcio se encuentra disponible en el mercado como un fertilizante nitrogenado y no especialmente para el consumo animal. El potencial mitigador del NO_3 ha mostrado un mayor efecto en el ganado productor de leche en comparación al ganado productor de carne. Este aditivo es una estrategia que puede mitigar las emisiones de CH_4 del ganado bovino en México, pero es necesaria mayor investigación a nivel local.

2. Compuestos que modifican la fermentación ruminal

Algunos de éstos son los metabolitos secundarios de plantas, como los taninos, las saponinas y los aceites esenciales.

Taninos (T)

Son compuestos fenólicos producidos por el metabolismo secundario en las plantas. Existen tres grupos de T según su estructura química y origen biosintético: T hidrolizables (TH), T condensados (TC) y fluorotaninos. La principal función de los T en las plantas es ofrecer protección contra depredadores, como insectos, microorganismos y herbívoros superiores (D'Mello, 1992). Los TC han sido ampliamente estudiados por sus efectos en la alimentación animal.

Ambos TC y TH han mostrado efecto de reducción de CH_4 . Derivado de esto, se ha indicado que la

adición de TC disminuye la producción de CH_4 por reducción en la fermentación del alimento en el rumen (Beauchemin *et al.*, 2007; Animut *et al.*, 2008). En estudios *in vivo* se ha reportado una disminución lineal de 3.53% en g de CH_4 /kg de consumo de materia seca, acompañado de reducciones en la digestibilidad de la materia orgánica en 2.6% por cada 10 g de TC/kg de materia seca (Aboagye y Beauchemin, 2019). Además, reduce el consumo de alimento en dosis mayores a 40 mg/kg de materia seca (Jayanegara *et al.*, 2012).

Los mecanismos de acción de TC que afectan la digestibilidad del alimento en el rumen son la formación de complejos TC-proteína del alimento y con las enzimas extracelulares de las bacterias, además de inhibir el crecimiento bacteriano de bacterias fibrolíticas (*Fibrobacter succinogenes*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Ruminobacter amylophilus* y *Streptococcus bovis*), reducir la degradación de la fibra (Makkar *et al.*, 1995; McSweeney *et al.*, 2001; Schofield *et al.*, 2001), y afectar a los protozoarios en el rumen (Aboagye y Beauchemin, 2019).

Por otro lado, el complejo TC-proteína llega al abomaso, donde por la condición de pH de 3 permite la separación del complejo y, como resultado, una mayor cantidad de proteína del alimento es digerida en abomaso y absorbida posteriormente (Min *et al.*, 2003; Carulla *et al.*, 2005; Mueller-Harvey, 2006; Wanapat *et al.*, 2015). En el intestino, los TC tienen la capacidad de formar nuevos complejos con nitrógeno de origen endógeno proveniente de secreciones (enzimas) del tubo digestivo y de células epiteliales de descamación (Kariuki y Norton, 2008). En consecuencia, de la unión de nuevos complejos en intestino, se incrementará la concentración de nitrógeno en heces (Mueller-Harvey, 2006) y se reduce en orina (Grainger *et al.*, 2009; Theodoridou *et al.*, 2010; Orlandi *et al.*, 2015; Aguerre *et al.*, 2016).

En estudios *in vivo* las concentraciones van de 5 a 270 g/kg de materia seca, con reducciones de 11% a 58% en g de CH_4 /kg de consumo de dicha materia. También se ha mostrado reducción de la digestibilidad del alimento en dosis superiores a 12 g/kg de materia seca (Orzuna-Orzuna *et al.*, 2021). En dosis de T mayores a 50 g/kg de materia seca, dependiendo el tipo, se ha reportado un efecto tóxico para el animal al causar irritación y descamación de

la mucosa intestinal, lesiones hepáticas y renales, úlceras e incluso la muerte (Reed, 1995).

Su efectividad depende del origen de los TC, su actividad puede variar, ya que algunos estudios proponen que el efecto de formación de complejos de TC está relacionado a su peso molecular (Patra y Saxena, 2009; Huang *et al.*, 2010) y a la interacción con otros compuestos, como fibra y proteína (Mueller-Harver, 2006). Sin embargo, Saminathan *et al.* (2014) mostraron que la capacidad de formación de complejos TC-proteína depende en mayor grado de la estructura del TC en relación con la proporción de prodelphininas:procianidinas. Una mayor proporción de prodelphininas (mayor número de grupos OH en el anillo B del grupo flavan-3-ol) aumenta la capacidad de unión del TC a proteínas. Hegarty *et al.* (2021) mencionan a los taninos como una estrategia con efecto reductor de ≤ 5 % en la producción de CH_4 entérico.

Los TC están presentes en los forrajes de regiones templadas y tropicales como las leguminosas, aunque varios estudios han realizado investigación con extractos de TC en especies de acacia, quebracho y castaño, lo cuales pueden contener tanto TC como TH.

Saponinas

Las saponinas son metabolitos de las plantas, compuestos por una base de azúcar (por ejemplo, glucosa, galactosa y ácido glucurónico) unida a una aglicona hidrofóbica o sapogenina, la cual puede conformarse por glicósidos triterpenoides y esteroides. Las saponinas producen efectos espumantes y emulsionantes (Vincken *et al.*, 2007).

Las saponinas reducen la población de protozoarios debido a su interacción con el colesterol en la membrana externa del protozoario (reducen la tensión superficial), resultando en un poro que produce la lisis del microorganismo (Augustin *et al.*, 2011). Este efecto se ha relacionado con la inhibición de arqueas por su asociación a protozoarios. Sin embargo, también se ha mostrado que la disminución de protozoarios y arqueas metanógenas no se asocia directamente con reducción de CH_4 , debido a que otras especies no dependientes de protozoarios podrían compensar el efecto con mayor producción de CH_4 en el rumen (Goel *et al.*, 2008).

Varios estudios mencionan que dosis de inclusión de ≤ 0.5 % de saponinas *in vivo* han mostrado el mayor efecto en mitigación en CH_4 , además de evitar reducir la digestibilidad y posible intoxicación en el animal (Ridla

et al., 2021). La limitada cantidad de estudios *in vivo* ha mostrado una reducción ≤ 5 % de CH_4 (Hegarty *et al.* 2021).

Existen diversos forrajes que contienen saponinas. Los más estudiados han sido los contenidos en té, yuca y quillaja, debido a que también se encuentran comercialmente disponibles en presentación de extractos para otros fines comerciales.

Aceites esenciales (AE)

En años recientes, los AE han llamado la atención como una alternativa natural para modificar la fermentación ruminal y reducir la producción de CH_4 en rumiantes. Es importante no confundirlos con los ácidos grasos provenientes de aceites vegetales. Los AE son mezclas complejas de compuestos volátiles, las plantas los sintetizan como parte de su metabolismo secundario, la composición es muy heterogénea, puede contener de veinte a sesenta compuestos, como terpenos, fenoles, alcoholes, cetonas, éteres y ésteres. Estos compuestos se encuentran presentes en hojas, tallos, raíces, frutos y semillas de plantas, los cuales son obtenidos por destilación, principalmente. Entre los más estudiados para la mitigación de CH_4 entérico se encuentran los AE de orégano (carvacrol y timol), canela (cinamaldehído), ajo (alicina), tomillo (timol y carvacrol), clavo de olor (eugenol), romero (1,8-cineol, alcanfor y α -pineno) y los obtenidos de cítricos como la naranja, toronja y limón (limoneno) (Cobellis *et al.*, 2016).

Se han descrito principalmente tres diferentes mecanismos de acción de los AE para la reducción del CH_4 entérico: 1) algunos compuestos en los AE reducen la cantidad de protozoarios y arqueas de forma selectiva, 2) se incrementa la producción de ácido propiónico en lugar de ácido acético, mejorando la eficiencia energética del animal y 3) se reduce la degradación de proteínas en el rumen, mejorando el aprovechamiento del alimento.

Los AE producen inhibición de bacterias gram positivas por facilitar el transporte de iones a través de la membrana que resulta en disrupción de la membrana por el gradiente de concentración. Como efecto indirecto favorece la fermentación de bacterias gram negativas hacia mayor producción de propionato y menor H_2 (Patra *et al.*, 2012).

Las reducciones de CH_4 en experimentos *in vivo* han fluctuado entre un 5% a 15%. Algunos factores que pueden influir en la efectividad son el tipo, la concentración a utilizar de AE en la dieta y su composición, el tipo de dieta, la dosis administrada y la adaptación de los micro-



La diversidad de las condiciones climáticas en México permite disponer de una amplia variedad de follajes, vainas de árboles y arbustos que contienen metabolitos secundarios (taninos condensados, saponinas, flavonoides y aceites esenciales) que se pueden emplear como suplementos alimenticios en los sistemas de producción lechera de pequeña escala, con potencial de mitigar las emisiones de CH₄ entérico



organismos ruminales (Benchaar *et al.*, 2008). El efecto en reducción se ha reportado en ≤ 5 % de CH_4 (Hegarty *et al.* 2021).

Las dosis por utilizar dependerán del tipo de aceite, concentración de compuestos activos y el objetivo de la administración; por ejemplo, se reportó que la alicina del ajo en una dosis de 500 mg/día redujo 18% las emisiones de CH_4 sin afectar la digestibilidad (Martínez-Fernández *et al.*, 2022), otros estudios revelan que el eugenol (clavo) en dosis de 0.4 a 0.6 g/kg de materia seca mostró reducciones de hasta un 27%, pero con respuestas variables por la dieta base (Rivera-Mendez *et al.*, 2023).

Los principales puntos por considerar con el uso de AE son: no afectar la fermentación ruminal y la palatabilidad y, con esto, evitar una reducción en el consumo de alimento además de evitar inducir toxicidad en el rumiante. Por lo tanto, todavía existen algunos desafíos para su implementación a nivel comercial o de unidades de producción.

Una de las limitantes de la aplicación a nivel de unidad de producción es la volatilidad de los AE, por lo tanto, es prioritario identificar una buena forma de administración. Algunas posibles formas son las siguientes: 1) mezclados en la ración al momento de la alimentación; 2) en el agua de bebida calculando una dosis adecuada; 3) en los minerales de la ración, sin que interactúen con los minerales y que el animal haga consumo de la cantidad adecuada de minerales, y 4) en bolos de lenta liberación previa evaluación técnica y económica.

3. Compuestos con efectos en la población y actividad de arqueas metanogénicas

3-Nitrooxypropanol (3-NOP)

El aditivo 3-NOP es un potente compuesto antimetanogénico, tiene una efectividad reportada de al menos 30% en cuanto a la mitigación de metano, pero en algunos experimentos este valor ha sido mayor. Además, actúa bloqueando a la metil coenzima M reductasa en la última reacción de reducción del CO_2 a CH_4 (Roques *et al.*, 2024) en la metanogénesis realizada por las arqueas en el rumen. Asimismo, reduce ligeramente el consumo de materia seca, mejora la eficiencia de conversión alimenticia e incrementa el porcentaje de los ácidos butírico y propiónico en el rumen de los bovinos (Martins *et al.*, 2025).

La dosis recomendada por el fabricante del aditivo 3-NOP es 60 mg/kg de materia seca consumida para vacas

lecheras, lo cual induce una reducción en las emisiones de CH_4 /día de 26% (Melgar *et al.*, 2020). En general, se considera un efecto de reducción mayor al 25 % de CH_4 (Hegarty *et al.*, 2021).

El aditivo 3-NOP fue aprobado para su uso comercial en México en 2024 y ha sido aprobado para su uso en otros países de Latinoamérica.

Algas marinas del género *Asparagopsis*

Las algas marinas del género *Asparagopsis* (taxiformis y armata) son potentes en lo que respecta a la mitigación de CH_4 entérico en rumiantes. Cowley *et al.* (2024) lograron prácticamente suprimir por completo la emisión de CH_4 de novillas suplementadas con 51 mg de bromoformo derivado de *Asparagopsis*/kg consumo de materia seca. Xie *et al.* (2025) reportaron una mitigación promedio de CH_4 de 44% (rango: 22%-75%) en bovinos suplementados con *Asparagopsis*. Hegarty *et al.* (2021) lo consideran un aditivo con efecto de reducción mayor al 25% de CH_4 (Hegarty *et al.* 2021).

El compuesto bioactivo bromoformo (CHBr_3) se ha relacionado principalmente con la reducción de CH_4 entérico de las algas rojas del género *Asparagopsis*. El CHBr_3 se liga a la coenzima M metiltransferasa, inhibiendo la transferencia del grupo metilo en el proceso de metanogénesis (Wood, 1968) en las arqueas.

La dosis recomendada de *Asparagopsis* es de hasta 1% del consumo de materia seca por los rumiantes, siendo los niveles recomendados de entre 0.2% a 0.5% de *Asparagopsis* en la dieta. El potencial de mitigación de CH_4 entérico va a depender de la concentración del compuesto CHBr_3 en las algas. El bromoformo es un compuesto volátil y disminuye su concentración con el tiempo, teniendo una reducción de 50% en sesenta días (Stefenoni *et al.*, 2021).

El uso comercial de las algas rojas del género *Asparagopsis* aún se encuentra en una etapa de confirmación debido al potencial riesgo de la permanencia del CHBr_3 en los productos de carne y leche, mismo que se encuentra en investigación. Además, se ha sugerido que el bromoformo es un potencial compuesto carcinógeno en humanos (EPA, 2000).

Desarrollo de aditivos antimetanogénicos en México

El desarrollo tecnológico de aditivos para la disminuir las emisiones de CH_4 es principalmente impulsado por las

políticas de los países que integran la Organización de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que acuerdan reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, las compañías identifican un nuevo mercado en el desarrollo de productos dirigidos a la industria ganadera e incrementar la producción.

El desarrollo de tecnologías con registro de patentes permite la generación de nuevos productos para fortalecer la economía local. Además, disponibles de tener un impacto en la mitigación de GEI y a su vez generar información para el monitoreo y reporte de las emisiones de gases. La primera patente registrada para la reducción de CH₄ entérico data de 1978 con el uso de un antibiótico vía oral. A partir de 2021 se ha observado un incremento en el registro y solicitudes de patentes a nivel mundial para reducir el CH₄. Los principales países con registros son la Unión Europea, Estados Unidos, Japón, Corea, China y Brasil. En México, se identifican 21 registros de patentes relacionados con aditivos alimentarios para ganado. Sin embargo, los solicitantes y/o titulares son compañías extranjeras.

Las patentes en aditivos antimetanogénicos se centran principalmente, en productos naturales, como la alicina de ajo, aceites esenciales, compuestos fenólicos, taninos, flavonoides, alcaloides, nitratos, sulfatos, probióticos (consorcios microbianos), bromoformo, haloformo y el compuesto sintético 3-nitrooxypropanol.

La mayoría de los aditivos patentados hacen mención a su efectividad a nivel *in vitro*, y los proveedores atribuyen una respuesta igual en el animal. Sin embargo, el desafío radica en tener el mismo efecto del producto en los animales. Para ello, es indispensable asegurar la efectividad del producto y la seguridad de su uso en las diferentes especies, así como la inocuidad en los productos finales para consumo humano. Por lo tanto, es necesario que la regulación para aprobar la comercialización de aditivos antimetanogénicos en México se evalúe y actualice a la normatividad internacional en beneficio de los potenciales consumidores de dichos productos (Tricarico *et al.*, 2025).

De acuerdo al censo 2022 agropecuario (INEGI, 2023), 66.7% de las unidades de producción agropecuaria, incluidos agricultura y ganadería, realizaron acciones para proteger el ambiente, donde las posibles barreras para la adopción de aditivos alimentarios para la mitigación de GEI radicarían principalmente en la percepción individual de los productores, una normal resistencia al cambio, el costo del aditivo, la falta de demostración sobre ahorro

energético para el animal al reducir las emisiones y una conversión en mayor productividad, temor al uso de nuevos productos y la falta de políticas públicas para incentivar la generación y uso de tecnologías.

En México a pesar de no contar con ningún registro o solicitud de patente, la diversidad en las condiciones climáticas permite disponer de una amplia variedad de follajes, vainas de árboles y arbustos que contienen metabolitos secundarios (taninos condensados, saponinas, flavonoides y aceites esenciales) que se pueden emplear como suplementos alimenticios en los sistemas de producción lechera de pequeña escala con potencial de mitigar las emisiones de CH₄ entérico.

Asimismo, se cuenta con una diversidad de tubérculos y frutos que contienen ciertas cantidades de almidón y otros compuestos que afectan positivamente la fermentación ruminal. Por lo anterior, es posible que algunos de estos recursos pudieran eventualmente resultar en el desarrollo de aditivos antimetanogénicos para uso en unidades de producción pecuaria en el país.

Conclusiones

En México, el uso de aditivos para la mitigación de metano no se ha implementado debido a que no existe un aliciente económico para el productor, por lo que el aditivo representa un gasto adicional. Existe un área de oportunidad para la implementación de políticas públicas que incentiven al productor a reducir las emisiones de sus animales a través de los certificados de carbono y otras posibles estrategias, y de esta manera transitar hacia una ganadería climáticamente inteligente que produzca alimentos de calidad e inocuos con el mínimo impacto ambiental. Es necesario intensificar la investigación científica para desarrollar aditivos antimetanogénicos a través de procesos de extracción de compuestos bioactivos que sean baratos, para así estimular su adopción en los sistemas de producción ganadera.

Referencias

- Aboagye, I. A., & Beauchemin, K. A. (2019). Potential of molecular weight and structure of tannins to reduce methane emissions from ruminants: A review. *Animals*, 9, 856. <https://doi.org/10.3390/ani9110856>
- Aguerre, M. J., Capozzolo, M. C., Lencioni, P., Cabral, C., & Wattiaux, M. A. (2016). Effect of quebracho-chestnut tannin extracts at 2 dietary crude protein levels on performance, rumen fermentation and nitrogen partitioning in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99, 4476-4486. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10745>
- Animut, G., Puchala, R., Goetsch, A. L., Patra, A. K., Sahlu, T., Varel, V. H., & Wells, J. (2008). Methane emission by goats consuming diets with different levels of condensed tannins from lespedeza. *Animal Feed Science and Technology*, 144, 212-227. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.10.014>
- Augustin, J. M., Kuzina, V., Andersen, S. B., & Bak, S. (2011). Molecular activities, biosynthesis and evolution of triterpenoid saponins. *Phytochemistry*, 72(6), 435-457.
- Beauchemin, K. A., McGinn, S. M., Martinez, T. F., & McAllister, T. A. (2007). Use of condensed tannin extract from quebracho trees to reduce methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 85, 1990-1996. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-686>
- Belanche, A., Bannink, A., Dijkstra, J., Durmic, Z., García, F., Santos, F.G., Huws, S., Jayanathan, J., Lund, P., Mackie, R., McAllister, T. A., Morgavi, D. P., Muetzel, S., Pitta, D.W., Yáñez-Ruiz, D.R., & Ungerfeld, E.M. (2025). Feed additives for methane mitigation: A guideline to uncover the mode of action of antimethanogenic feed additives for ruminants. *Journal of Dairy Science*, 108, 375-394. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25046>
- Benchaa, C., Calsamiglia, S., Chaves, A. V., Fraser, G. R., Colombatto, D., McAllister, T. A., & Beauchemin, K. A. (2008). A review of plant-derived essential oils in ruminant nutrition and production. *Animal Feed Science and Technology*, 145(1), 209-228. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.04.014>
- Carulla, J. E., Kreuzer, M., Machmüller, A., & Hess, H. D. (2005). Supplementation of Acacia mearnsii tannins decreases methanogenesis and urinary nitrogen in forage-fed sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 961-970.
- Cobellis, G., Trabalza-Marínucci, M., & Yu, Z. (2016). Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: A review. *The science of the total environment*, 545, 556-568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.103>
- Cowley, F. C., Kinley, R. D., Mackenzie, S. L., Fortes, M. R. S., Palmieri, C., Simanungkalit, G., Almeida, A. K. & Roque, B. M. (2024). Bioactive metabolites of Asparagopsis stabilized in canola oil completely suppress methane emissions in beef cattle fed a feedlot diet. *Journal of Animal Science*, 2024, 102 skae 109 <https://doi.org/10.1093/jas/skae109>
- D'Mello, J. P. F. (1992). Chemical constraints to the use of tropical legumes in animal nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 38, 237-261.
- EPA. (2000). Bromoform. Acceso Febrero 20, 2025. www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/bromoform.pdf
- Goel, G., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2008). Changes in microbial community structure, methanogenesis and rumen fermentation in response to saponin-rich fractions from different plant materials. *Journal of Applied Microbiology*, 105(3), 770-777. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03818.x>
- Grainger, C., Clarke, T., Auldist, M. J., Beauchemin, K. A., McGinn, S. M., Waghorn, G. C., & Eckard, R. J. (2009). Potential use of Acacia mearnsii condensed tannins to reduce methane emissions and nitrogen excretion from grazing dairy cows. *Journal of Animal Science*, 89, 241-251.
- Hegarty, R. S., Passetti, R. A., Dittmer, K. M., Wang, Y., Shelton, S., Emmet-Booth, J., Wollenberg, E., McAllister, T., Leahy, S., Beauchemin, K., & Gurwick, N. (2021). An evaluation of evidence for efficacy and applicability of methane inhibiting feed additives for livestock. A report coordinated by Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) and the New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre (NZAGRC) initiative of the Global Research Alliance (GRA). <https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2021/12/An-evaluation-of-evidence-for-efficacy-and-applicability-of-methane-inhibiting-feed-additives-for-livestock-FINAL.pdf>
- Hristov, A.N., Bannink, A., Batelli, M., Belanche, A., Cajarville Sanz, M. C., Fernández-Turren, G., García, F., Jonker, A., Kenny, D. A., Lind, V., Meale, S. J., Zilio, D. M., Muñoz, C., Pacheco, D., Peiren, N., Ramin, M., Rapetti, L., Schwarm, A., Stergiadis, S., Theodoridou, K., Ungerfeld, E. M., van Gastelen, S., Yáñez-Ruiz, D. R., Waters, S. M., & Lund, P. (2025). Feed additives for methane mitigation: Recommendations for testing enteric methane-mitigating feed additives in ruminant studies. *Journal of Dairy Science*, 108(1), 322-355. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25044>
- Huang, X. D., Liang, J. B., Tan, H. Y., Yahya, R., Khamseekhiew, B., & Ho, Y. W. (2010). Molecular weight and protein binding affinity of Leucaena condensed tannins and their effects on in vitro fermentation parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 159, 81-87.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI) (2023). Censo Agropecuario 2022. Acceso febrero 20, 2025. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf
- Jayanegara, A., Leiber, F., & Kreuzer, M. (2012). Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 96, 365-375.
- Johnson, K. A. and Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73, 2483-2492.
- Kariuki, I. & Norton, B. (2008). The digestion of dietary protein bound by condensed tannins in the gastro-intestinal tract of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 142, 197-209.
- Makkar, H. P. S., Blümmel, M., & Becker, K. (1995). Formation of complexes between polyvinyl pyrrolidone and polyethylene glycol with tannins and their implications in gas production and true digestibility in vitro techniques. *British Journal of Nutrition*, 73, 897-913.
- Martínez-Fernández, G., Abecia, L., Arco, A., Cantalapiedra-Hijar, G., & Molina-Alcaide, E. (2022). Garlic essential oil reduces methane emissions and improves milk production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(6): 5127-5139. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21489>

- Martins, L. F., Maigaard, M., Johansen, M., Lund, P., Ma, X., Niu, M., & Hristov, A. N. (2025). Lactational performance effects of 3-nitrooxypropanol supplementation to dairy cows: A meta-regression. *Journal of Dairy Science*, 108, 1538–1553. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25653>
- McSweeney, C. S., Palmer, B., McNeill, D. M., & Krause, D. O. (2001). Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 91, 83–93.
- Melgar, A., Harper, M. T., Oh, J., Giallongo, F., Young, M. E., Ott, T. L., Duval, S., & Hristov, A. N. (2020). Effect of 3-nitrooxypropanol on rumen fermentation, lactational performance and resumption of ovarian cyclicity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103, 410–432. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17085>
- Min, B. R., Barry, T. N., Attwood, G. T., & McNabb, W. C. (2003). The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 106, 3–19.
- Mueller-Harvey, I. (2006). Unravelling the conundrum of tannins in animal nutrition and health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 2010–2037.
- Newbold, J. R., Van Zijderveld, S. M., Hulshof, R. B. A., Fokkink, W. B., Leng, R. A., Terencio, P., Powers, W. J., van Adrichem, P. S. J., Paton, N. D., & Perdok, H. B. (2014). The effect of incremental levels of dietary nitrate on methane emissions in Holstein steers and performance in Nelore bulls. *Journal of Animal Science*, 92, 5032–5040.
- Orlandi, T., Kozloski, G. V., Alves, T. P., Mesquita, F. R., & Ávila, S. C. (2015). Digestibility, ruminal fermentation and duodenal flux of amino acids in steers fed grass forage plus concentrate containing increasing levels of *Acacia mearnsii* tannin extract. *Animal Feed Science and Technology*, 210, 37–45.
- Orzuna-Orzuna, J., Dorantes-Iturbide, G., Lara-Bueno, A., Mendoza-Martínez, G., Miranda-Romero, L., & Hernández-García, P. (2021). Effects of dietary tannins' supplementation on growth performance, rumen fermentation, and enteric methane emissions in beef cattle: A meta-analysis. *Sustainability*, 13(13), 7410. <https://doi.org/10.3390/su13137410>
- Patra, A. K. & Saxena, J. (2009). Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of the effects on microbial populations. *Antonie van Leeuwenhoek*, 96, 363–375. <https://doi.org/10.1007/s10482-009-9364-1>.
- Patra, A. K. (2012). Enteric methane mitigation technologies for ruminant livestock: a synthesis of current research and future directions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 1929–1952.
- Reed, J. D. (1995). Nutritional toxicology of tannins and related polyphenols in forage legumes. *Journal of Animal Science*, 73, 1516–1528.
- Ridla, M., Laconi, E. B., Nahrowi, & Jayanegara, A. (2021). Effects of saponin on enteric methane emission and nutrient digestibility of ruminants: An in vivo meta-analysis. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 788(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012028>
- Rivera-Méndez, C., Pliego, A. B., Salem, A. Z. M., & Ronquillo, M. G. (2023). Eugenol as a methane mitigation strategy in ruminants: A meta-analysis. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1124521. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1124521>
- Roques, S., Martínez-Fernández, G., Ramayo-Caldas, Y., Popova, M., Denman, S., Meale, S.J. & Morgavi, D.P. (2024). Recent advances in enteric methane mitigation and the long road to sustainable ruminant production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 12, 321–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021022-024931>
- Saminathan, M., Tan, H. Y., Sieo, C. C., Abdullah, N., Wong, C. M. V. L., Abdulmalek, E., & Ho, Y. W. (2014). Polymerization degrees, molecular weights and protein-binding affinities of condensed tannin fractions from a *Leucaena leucocephala* hybrid. *Molecules*, 19, 7990–8010.
- Schofield, P., Mbugua, D. M., & Pell, A. N. (2001). Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 91, 21–40.
- Stefenoni, H. A., Räisänen, S. E., Cueva, S. F., Wasson, D. E., Lage, C. F. A., Melgar, A., Fetter, M. E., Smith, P., Hennessy, M., Vecchiarelli, B., Bender, J., Pitta, D., Cantrell, C. L., Yarish, C. & Hristov, A. N. (2021). Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104(4), 4157–4173. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19686>
- Theodoridou, K., Aufrère, J., Andueza, D., Pourrata, J., Morvana, A. L., Stringano, E., Mueller-Harvey, I., & Baumonta, R. (2010). Effects of condensed tannins in fresh sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) on in vivo and in situ digestion in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 160, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.06.007>
- Tricarico, J. M., García, F., Bannink, A., Lee, S., Miguel, M. A., Newbold, J. R., Rosenstein, P. K., van der Saag, M. R., & Yañez-Ruiz, D. (2025). Feed additives for methane mitigation: Regulatory frameworks and scientific evidence requirements for the authorization of feed additives to mitigate ruminant methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 108, 395–410.
- Van Zijderveld, S. M., Gerrits, W. J. J., Apajalahti, J. A., Newbold, J. R., Dijkstra, J., Leng, R. A., & Perdok, H. B. 2010. Nitrate and sulfate: Effective alternative hydrogen sinks for mitigation of ruminal methane production in sheep. *Journal of Dairy Science*, 93(12), 5856–5866. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3281>.
- Vincken, J. P., Heng, L., de Groot, A., & Gruppen, H. (2007). Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. *Phytochemistry*, 68(3), 275–297.
- Wanapat, M., Cherdthong, A., Phesatcha, K., & Kang, S. (2015). Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability. *Animal Nutrition*, 1(3), 96–103. doi.org/10.1016/j.aninu.2015.07.004
- Wood J. M., Kennedy F. S., & Wolfe R. S. (1968). Reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B12. *Biochemistry*. 7(5), 1707–1713. [doi:10.1021/bi00845a013](https://doi.org/10.1021/bi00845a013)
- Xie, X., Cao, Y., Li, Q., Li, Q., Yang, X., Wang, R., Zhang, X., Tan, Z., Lin, B., & Wang M. (2025). Mitigating enteric methane emissions: An overview of methanogenesis, inhibitors and future prospects. *Animal Nutrition Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.02.001>

14

PRODUCCIÓN DE FORRAJE DE MAÍZ COMO ESTRATEGIA DE PRODUCTIVIDAD Y MITIGACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES CON EFECTO INVERNADERO DE VACAS LECHERAS

José de Jesús Olmos Colmenero¹

Ernesto Medina Nuñez²

Silviano Gallardo Ramírez³

Laura Gómez de la Torre¹

Ofelia Íñiguez Gómez¹

Edgar Eduardo Pulido Chávez¹

¹Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara

²Escuela Nacional de Lechería Sustentable S. de P.R. de R.L.

³Instituto de Desarrollo Pecuario de Los Altos de Jalisco S.C.



Los forrajes son la base de la alimentación de los rumiantes. Si un forraje se produce localmente y se maximiza su rendimiento y calidad nutricional en cada hectárea sembrada, se obtiene un alimento de bajo costo que tiene el potencial de contribuir a una producción sustentable de leche

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la temperatura de la superficie del planeta incrementó en 1.1 °C de los años 1850-1900 a los años 2011-2020 y, desafortunadamente, se espera que siga incrementando en el futuro (GIECC, 2023). La agricultura es uno de los sectores productivos mayormente afectado por el cambio climático, haciendo mucho más compleja la producción de alimentos y poniendo en riesgo lograr una producción suficiente para satisfacer las necesidades de la población humana.

Los forrajes son la base de la alimentación de los rumiantes. Si un forraje se produce localmente y se maximiza su rendimiento y calidad nutricional en cada hectárea sembrada, se obtiene un alimento de bajo costo que tiene el potencial de contribuir a una producción sustentable de leche. El forraje más utilizado en la alimentación del ganado lechero en la mayoría de los establos del centro y norte de México es, indudablemente, el forraje de maíz que regularmente se almacena como ensilaje.

Por lo tanto, es fundamental identificar áreas de oportunidad en el proceso de producción, cosecha y almacenamiento del forraje de maíz que permitan implementar estrategias para obtener la mayor cantidad posible de nutrientes por unidad de superficie sembrada en el cada vez más complejo y cambiante clima de las diferentes regiones productoras de leche de México, esperando que estas estrategias contribuyan, en el mediano y largo plazo, a lograr la neutralidad del carbono

en los sistemas de producción de leche, esto es, que las emisiones de carbono del suelo, de los animales y por el consumo de combustibles sean equivalentes a la captura de carbono por elementos de los mismos sistemas, especialmente por las plantas de maíz destinadas a la producción de forraje.

A continuación, se presentan dos estrategias que pueden contribuir a la producción sustentable de forraje de maíz de alta calidad nutricional para la producción de leche. Estas estrategias están basadas en resultados de mediciones realizadas durante los últimos diez años en la región Altos de Jalisco, en el estado de Jalisco, que además es una de las principales demarcaciones productoras de leche en México. Es importante resaltar que, en esta pequeña región que cuenta con 14,970 km², en 2024 se sembraron 132,899 hectáreas para la producción de forraje de maíz que representaron 22.9% de la totalidad de hectáreas sembradas en el país para este cultivo (SIAP, 2025). La mayor proporción de ese forraje se destina a la alimentación del ganado lechero alteño. En 2024, en Altos de Jalisco se produjeron 1,893,381,000 de litros de leche que representaron 14.0% de la producción del país (SIAP, 2025).

El forraje de maíz de alta calidad, regularmente almacenado como ensilaje, se puede definir como el que, además de producirse en alta cantidad por superficie sembrada, tiene un contenido de almidón $\geq 30\%$ y de fibra detergente neutro $\leq 45\%$ con digestibilidades $\geq 97\%$ y $\geq 55\%$, respectivamente.

Selección de la semilla

Actualmente, en Altos de Jalisco se oferta un gran número de diferentes semillas de maíz para la producción de forraje. Sin embargo, diferentes semillas de maíz sembradas en una misma localidad pueden expresar rendimientos y calidades nutricionales del forraje muy diferentes de acuerdo con su potencial genético. Por ejemplo, de acuerdo con Medina *et al.* (2024), el rendimiento promedio

de materia seca de forraje de 15 semillas de maíz fue de 23.6 toneladas por hectárea en una parcela experimental con riego en Lagos de Moreno, Jalisco, en 2023 (cuadro 1). Mientras que el rendimiento promedio de las siete semillas estadísticamente superiores ($P < 0.10$) y el de las cinco inferiores fue de 27.8 y 17.9 toneladas, respectivamente.

Cuadro 1. Resultados del contenido de nutrientes, rendimiento de materia seca y digestibilidad *in situ* del forraje de diferentes semillas de maíz evaluadas una localidad de Lagos de Moreno, Jalisco (21°18'27.03" N y 102°02'46.57" O), en condiciones de riego en 2023. Tomado de Medina *et al.* (2024)

		MS	CEN	GC	PC	FDN	CNF	RMS	DMS30	RMSD30
Marca	Híbrido	%	% de MS	% de MS	% de MS	% de MS	% de MS	t/ha	% de MS	t/ha
ASPROS	Espartaco	38.7	4.11	2.38	6.92	42.8	43.8	30.0	64.2	19.3
NK	NK880W	38.3	4.81	2.29	7.55	45.2	40.2	29.9	62.1	18.6
ASPROS	Patriota	37.1	4.41	2.45	7.10	43.2	42.9	28.1	62.0	17.4
NK	NK921W	37.7	4.87	2.17	7.39	46.1	39.5	27.1	61.8	16.8
TECHAG	TG977W	39.3	4.83	2.15	7.57	47.0	38.5	27.1	60.0	16.2
ASPROS	Supremo	38.8	4.69	2.20	7.45	46.0	39.7	26.3	61.6	16.2
PIONEER	P32208W	36.5	4.53	2.20	6.99	45.4	40.9	26.3	59.0	15.5
NK	NK858W	34.8	4.19	2.17	7.35	45.2	41.1	25.2		
ASGROW	Alce	37.6	4.34	2.12	6.57	45.9	41.1	22.8		
ASGROW	Salamandra	37.5	4.40	2.18	6.72	45.9	40.8	22.2		
DEKALB	DK-4021	38.2	4.53	2.14	6.26	47.3	39.8	19.7		
ASGROW	Kodiak	36.6	4.06	2.48	6.79	42.4	44.3	19.4		
DEKALB	DK-4018	37.8	4.29	2.09	6.59	46.9	40.1	17.6		
NOVASEM	NB950	39.3	4.51	1.89	6.93	49.1	37.5	17.4		
CERES	XR60	38.8	4.10	2.23	6.83	44.4	42.4	15.2		
	Promedio	37.8	4.44	2.21	7.00	45.5	40.8	23.6	61.5	17.1
	DMS 0.10	5.28	0.43	0.22	0.57	2.55	2.62	4.53		2.99

MS=contenido de materia seca; CEN=ceniza; GC=grasa cruda; PC=proteína cruda; FDN=fibra detergente neutro; CNF=carbohidratos no-fibrosos; RMS=rendimiento de materia seca, toneladas por hectárea; DMS30=digestibilidad ruminal *in situ* de la materia seca en 30 horas; RMSD30=rendimiento de materia seca digestible, toneladas por hectárea; y DMS 0.10=diferencia mínima significativa a un nivel de probabilidad del 10%. Los valores resaltados en negritas en cada columna conforman el grupo estadísticamente superior.



Otro aspecto por considerar es que, aún entre las semillas que expresaron un alto rendimiento de forraje hubo diferencias sustanciales en la digestibilidad de la materia seca que, a su vez, determinaron una gran diferencia en el rendimiento de materia seca digestible por hectárea. Entre la primera y séptima semilla enlistadas en el cuadro 1, dicha diferencia fue de 3.8 toneladas por hectárea. Materia seca digestible se traduce en energía y nutrientes potencialmente disponibles para que las vacas puedan producir leche.

Es muy importante considerar que una misma semilla de maíz sembrada en diferentes condiciones de suelo y clima puede expresar diferentes rendimientos y calidades del forraje. Por lo tanto, es conveniente que, en una misma región geográfica, como Altos de Jalisco, se realicen evaluaciones de rendimiento y calidad nutricional del forraje producido por diferentes semillas de maíz en diversas localidades.

Madurez de la planta a la cosecha

En la literatura existe evidencia muy sólida que demuestra que cuando la planta de maíz tiene las condiciones de crecimiento adecuadas, después de la floración, conforme

avanza su edad, su contenido de materia seca disminuye y el rendimiento de materia seca por hectárea y el contenido de almidón del forraje incrementan (Darby y Lauer, 2002). Sin embargo, también existe evidencia que indica que conforme incrementa la madurez de la planta a la cosecha (con un contenido de materia seca $\geq 35\%$), la digestibilidad de la fibra detergente neutro disminuye influyendo negativamente en la calidad del forraje.

Además, algunos técnicos y productores argumentan que cuando el forraje se cosecha seco (con un contenido de materia seca $\geq 40\%$), es muy difícil su compactación y se vuelve muy susceptible a descomponerse durante su almacenamiento como ensilaje. Estas evidencias y argumentos generan incertidumbre en los productores para determinar el inicio de la cosecha del forraje de maíz.

En el año 2018 Ramírez Gutiérrez (2021) evaluó el rendimiento de materia seca y la composición nutricional del forraje producido por cinco diferentes semillas de maíz en San Juan de los Lagos, Jalisco, en condiciones de riego por goteo. Las plantas se cosecharon, después de floración, en nueve fechas diferentes (84, 94, 100, 107, 114, 121, 128, 135 y 142 días después de siembra).

Cuadro 2. Resultados del contenido de materia seca y nutrientes, rendimiento de materia seca y digestibilidad *in situ* del forraje de cinco semillas híbridas de maíz evaluadas en una localidad de San Juan de los Lagos en condiciones de riego por goteo en 2018. Tomado de Ramírez Gutiérrez (2021)

	Días a la cosecha después de siembra								
Variable	84	94	100	107	114	121	128	135	142
Materia seca del forraje, %	14.8	14.8	16.3	18.9	22.3	26.6	30.3	35.3	38.5
Rendimiento de materia seca, t/ha	13.3	14.3	16.2	19.1	21.1	23.5	23.9	28.6	31.3

Composición química, % MS									
FDN	66.0	68.4	61.6	57.2	55.0	51.8	49.8	48.1	45.4
FDA	33.4	33.4	32.2	34	33.6	33	34.2	33.8	32.2
PC	9.2	8.8	8.2	8.5	8.2	8.1	7.9	7.8	8.3
EE	2.9	2.5	2.1	2.0	2.3	2.5	2.7	2.8	2.8
Cenizas	8.8	8.4	8.0	7.5	7.1	6.5	6.4	6.4	5.6
CNF	13.1	11.9	20.1	24.8	27.4	31.1	33.2	34.9	37.9
Almidón	0.5	1.3	4.0	12.1	14.5	20.8	21.5	23.0	25.3
ENL, Mcal/kg de MS	1.39	1.37	1.41	1.43	1.46	1.50	1.51	1.52	1.55

Digestibilidad ruminal <i>in situ</i> 48 h									
Materia seca, %	48.0	46.4	51.5	--	54.8	59.1	59.2	59.4	60.9
FDN, % de la MS	33.2	34.1	33	--	30.5	32.7	30.1	28.5	26.5

MS=materia seca; FDN=fibra detergente neutro; FDA=fibra detergente ácido; PC=proteína cruda; EE=extracto etéreo; CNF=carbohidratos no-fibrosos y ENL=energía neta de lactancia.

El rendimiento de materia seca y el contenido de materia seca, carbohidratos no-fibrosos, almidón y energía neta de lactancia incrementaron en el forraje en respuesta a la fecha de corte (cuadro 2). La digestibilidad de la materia seca incrementó y la digestibilidad de la fibra detergente neutro disminuyó ligeramente en respuesta a una mayor edad (y contenido de materia seca) de la planta.

En el ciclo de verano de 2023, nuestro equipo de trabajo realizó otra evaluación similar a la de 2018 en siete

localidades experimentales. Cuatro de éstas se manejaron en condiciones de riego y tres en condiciones de temporal, para medir el rendimiento y calidad nutricional del forraje de maíz (información sin publicar). Tres de las cuatro localidades de riego se sembraron en el municipio de San Juan de los Lagos (SJL-SF-R, SJL-CO-R y SJL-AB-R) y la otra en el municipio de Lagos de Moreno (LMO-SJ-R). Las tres localidades de temporal se sembraron en San Miguel el Alto (SMA-SM-T), Zapotlanejo (ZAP-NX-T) y Tepatitlán

El forraje más utilizado en la alimentación del ganado lechero en la mayoría de los establos de México es el forraje de maíz, generalmente como ensilaje

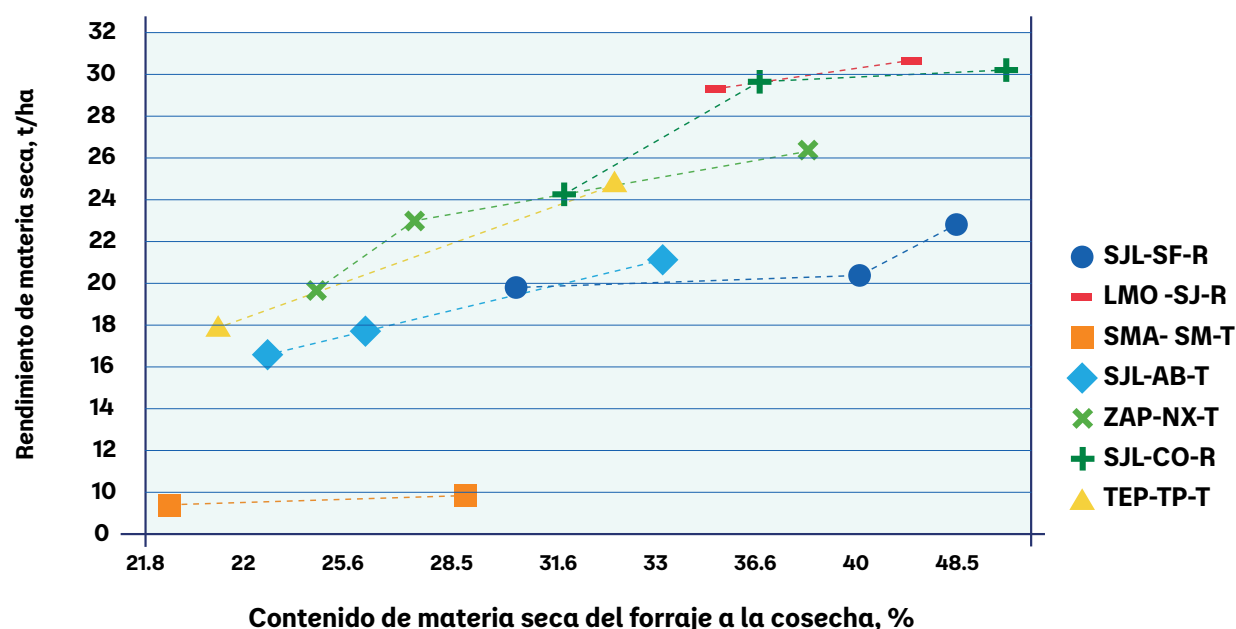
de Morelos (TEP-TP-T), respectivamente. En las cuatro localidades de riego y en una de temporal se sembraron dos semillas diferentes; en una localidad de riego y en una de temporal sólo se sembró una sola semilla. En una localidad de riego las plantas de una de las dos semillas sembradas fueron severamente dañadas por una enfermedad; por lo tanto, sólo se cosechó el forraje de una sola semilla. En las siete localidades el maíz se sembró a razón de 110,000 semillas por hectárea. En las diferentes localidades el forraje se cosechó en dos o tres etapas de madurez de las plantas usando como criterio su contenido de materia seca.

En las siete localidades experimentales se observó un incremento en el rendimiento de materia seca por hectárea

en respuesta a una mayor madurez de las plantas (figura 1), aun en las localidades de temporal a pesar de que, ese año (2023), la precipitación pluvial fue muy escasa en Altos de Jalisco. De junio a noviembre, fechas en que estuvieron en pie las plantas de maíz, la precipitación pluvial registrada en las localidades de temporal fue de 279, 477 y 630 mm en SMA-SM-T, ZAP-NX-T y TEP-TP-T, respectivamente.

Después de floración en las plantas de maíz se inicia la acumulación de grano y ésta se incrementa conforme avanza la madurez y el contenido de materia seca de la planta. Esto se ve reflejado en un incremento en la concentración de almidón en el forraje (figura 2). Por lo tanto, es muy importante monitorear el contenido de materia seca de las plantas para definir con precisión el inicio de la cosecha.

Figura 1. Rendimiento de materia seca (toneladas/hectárea) del forraje de maíz en respuesta al contenido de materia seca de las plantas en siete localidades experimentales de la región Altos de Jalisco durante el ciclo de lluvias de 2023

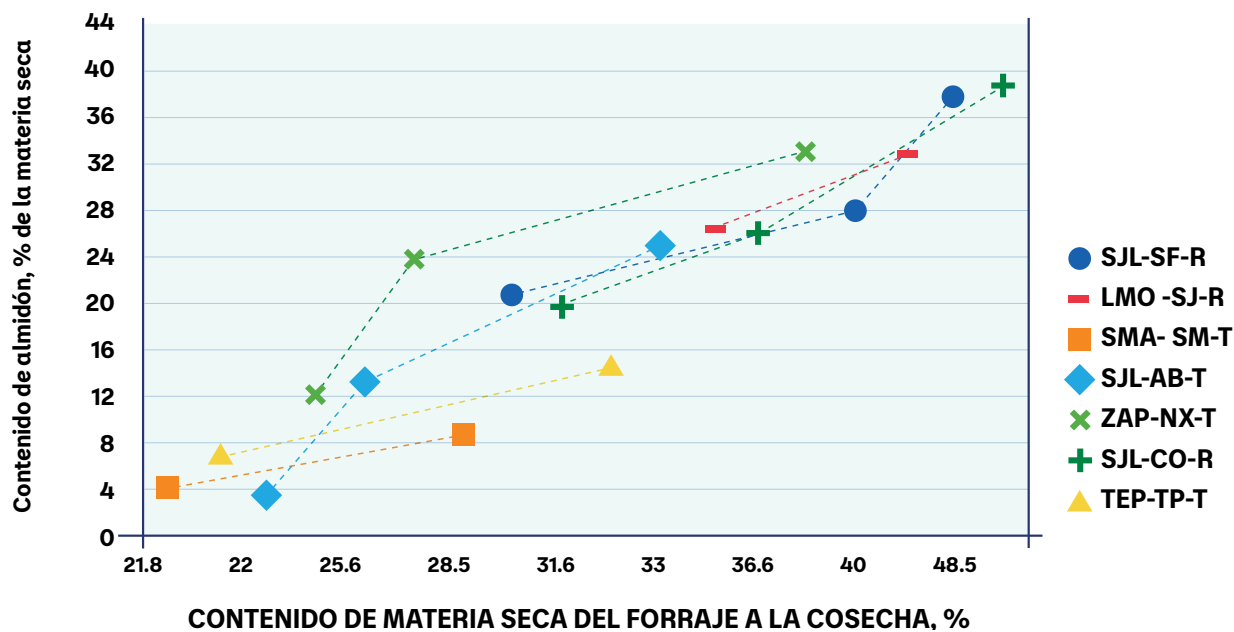


La correcta decisión de selección de semilla de maíz y de madurez de la planta a la cosecha, contribuye a la producción sustentable de ensilaje de maíz y leche





Grafica 2. Contenido de almidón (% de la materia seca) del forraje de maíz en respuesta al contenido de materia seca de las plantas en siete localidades experimentales de la región Altos de Jalisco durante el ciclo de lluvias de 2023



Reflexión

Si un productor selecciona una semilla de maíz de alto rendimiento, de preferencia evaluada en la misma localidad donde tiene su parcela de trabajo o en su región y cosecha el forraje cuando la planta acumuló una importante cantidad de grano, y como consecuencia de almidón, entonces la cantidad y calidad nutricional del forraje será mucho mayor.

La ecuación de regresión y $= -0.0193x^2 + 1.8371x - 16.272$ ($R^2 = 0.5248$), donde y = rendimiento de materia seca en toneladas por hectárea y x = contenido de materia seca del forraje en porcentaje, se estimó con los resultados de las 18 cosechas que se realizaron en las siete diferentes parcelas experimentales en 2023 (gráfica 1). Esta ecuación indica que, si se cosecha el forraje de maíz cuando las plantas tienen un contenido de materia seca de 35% se obtiene un rendimiento de 24.4 toneladas de materia seca por hectárea mientras que, si el forraje se cosecha cuando las plantas tienen un contenido de materia seca de 40% se obtiene un rendimiento de 26.3 toneladas. La diferencia entre estos dos criterios de cosecha es de 1.9 toneladas de materia seca por hectárea.

Esa diferencia en rendimiento de materia seca tiene implicaciones muy importantes:

- 1) 1.9 toneladas de materia seca equivalen a 4.75 toneladas de forraje fresco [$1.9/(40.0/100) = 4.75$] que, al precio de 2023 en Altos de Jalisco de \$2,000.00/t, representan un incremento en el valor de la cosecha de \$9,500.00 por hectárea.
- 2) Si el productor del forraje de maíz es también productor de leche, entonces, el beneficio económico puede ser mucho mayor. Si se asume que el contenido energético del forraje de maíz es de 1.35 mega calorías de energía neta de lactancia por kg de materia seca (un valor conservador), la diferencia de 1.9 toneladas de materia seca por hectárea representa 2,565 mega calorías. Una vaca lechera necesita alrededor de 0.72 mega calorías de energía neta de lactancia para producir un kg de leche, por lo tanto, con las 2,565 mega calorías de energía se pueden producir 3,563 kg de leche. Si el precio de la leche es de \$9.50/kg, esa diferencia representa \$33,848.50 por hectárea.
- 3) Gran parte de la energía que se utiliza para la producción de leche en la región Altos de Jalisco se importa como grano de maíz de otras regiones del país o de Estados Unidos de América. Por lo tanto, cosechar energía en el forraje de maíz, además de generar riqueza localmente, evita la quema de combustible para el traslado del grano de aproximadamente 3,000 km desde el medio oeste de EUA. Además, si se considera que el carbono en la planta

de maíz representa 43% de la materia seca, entonces cada hectárea tiene el potencial de incrementar la captura de CO₂ atmosférico en 6.97 toneladas [1.9 t de materia seca/ (12/44) = 6.97, donde 12 es el peso de un mol de carbono y 44 es el peso de un mol de la molécula de CO₂].

La magnitud del impacto regional de dos decisiones, la selección de la semilla y la madurez de la planta a la cosecha tiene el potencial de contribuir fuertemente a la producción sustentable de forraje de maíz y leche. Suponiendo que los productores de forraje de maíz que trabajan 10,000 hectáreas, de las 132,899 destinadas a esta actividad en Altos de Jalisco en 2024 (SIAP, 2025), se convencer de cosechar las plantas cuando su contenido de materia seca es de 40%, en lugar de cosecharlas con 35%, potencialmente pueden incrementar: a) el valor eco-

nómico de la producción de forraje en \$95,000,000.00 (10,000 ha x \$9,500/ha); b) si el productor de ensilaje de maíz es también productor de leche, entonces el valor de ese incremento en producción de forraje representa \$338,485,000.00 (10,000 ha x \$33,848.50 por ha); y c) la captura de CO₂ atmosférico en 69,700 toneladas (10,000 ha x 6.97 t/ha).

Con plantas de maíz maduras es muy importante seguir prácticas de cosecha y almacenamiento adecuadas para evitar pérdidas por descomposición del forraje. Esto es, picar las plantas a un tamaño de partícula adecuado, compactar el forraje con una alta densidad (245 kg de materia seca/m³) y sellar el silo inmediatamente después de terminar la compactación para aislar el forraje del aire.

Referencias

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (GIECC). (2023) Climate Change Synthesis Report. Consultado el 25 de marzo de 2024, de https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

Darby, H. M. & Lauer, J. G. (2002). Planting date and hybrid influence on corn forage yield and quality. *Agronomy Journal*. 94, 281-289.

Medina Núñez, E., Gómez González E. J., Ramírez Anaya, A., Gallardo Ramírez, S., Gómez de la Torre, L., Iñiguez Gómez, O., Peña Ramos, A., Santana, O. I., Pulido Chávez, E. E., Orozco López, C. L., Virgen García, C. & Olmos Colmenero J. J. (2024). Evaluación 2023 del rendimiento y calidad nutricional de híbridos de maíz para la producción sustentable de ensilaje en la región Altos de Jalisco. Publicación de difusión técnica con la colaboración de: Centro Universitario de Los Altos, Universidad

de Guadalajara; Instituto de Desarrollo Pecuario de Los Altos de Jalisco SC; Proteína Animal SA de CV; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Escuela Nacional de Lechería Sustentable S de PR de RL.

Ramírez Gutiérrez, D. E. (2021). Acumulación de materia seca, rendimiento y perfil nutricional de forraje de maíz cosechado a diferentes estados de madurez en los Altos de Jalisco. Tesis de Maestría. Maestría Interinstitucional en Producción Pecuaria. Universidad de Guadalajara.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Avance de Producción Agrícola 2023 México. Consultado el 17 de febrero de 2025, de <https://www.gob.mx/siap/#1410>

15

MANEJO DE ESTIÉRCOL

Rafael Olea Pérez¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



El manejo del estiércol es una estrategia muy importante en la descarbonización del sector lácteo, ya que modula no sólo la emisión de metano, sino también la de óxido nitroso que, aunque es mucho menor en volumen que lo que se produce de metano, es diez veces más potente que éste, como gas de efecto invernadero

Sin duda, el estiércol ofrece la mejor oportunidad de innovación tecnológica para el sector lácteo mexicano, pues la diversidad de conocimiento tecnológico actualmente disponible permite su aplicación, tanto para propietarios con una sola vaca, como en unidades industriales de tenencia ganadera especializada en leche.

De igual manera, el manejo del estiércol es una gran ventana de oportunidad como estrategia inmediata de descarbonización para el sector. Pues, aun cuando los reflectores se los llevan las estrategias para el control de la fermentación ruminal por ser la principal fuente de emisiones de metano, el manejo del estiércol modula no sólo otra fuente adicional de metano, sino también la emisión de óxido nitroso que, aunque es mucho menor en volumen que lo que se produce de metano, es diez veces más potente que éste, como gas de efecto invernadero (GEI).

Así, si consideramos que en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero el manejo del estiércol contribuye con al menos 35% de las emisiones del sector pecuario (INECC, 2018), y que estas estimaciones son muy generales y seguramente en la medida que se afinen crecerá su contribución al inventario (Hernández, 2021), el manejo del estiércol, favoreciendo su aprovechamiento, sin duda es la medida más inmediata y práctica que tiene el sector lácteo mexicano para contribuir rápidamente a la descarbonización del vacuno.

Por otra parte, como ventana de oportunidad el manejo de estiércol no es sólo una obligación normada oficialmente,

sino la materia prima de productos alternativos con valor comercial y ambiental, que pueden contribuir con más de 35% a las tres necesidades principales del reto mayor en el siglo XXI: la resiliencia y adaptación al cambio climático, más la reducción de emisiones de compuestos de vida corta y gases con efecto invernadero.

Adicionalmente, a diferencia de las estrategias propuestas para modificar la fermentación ruminal de las vacas, donde la investigación está tratando de plantear alternativas tecnológica, económica y ambientalmente viables, en el manejo de estiércol ya existe un abanico tecnológico que va desde innovar en generar fertilizantes y plaguicidas orgánicos, hasta energías alternativas o bien fuentes de fertilización líquida. Productos que no sólo contribuyen ambientalmente, sino que facilitan la economía circular, la integración productiva y potencializan oportunidades de trabajo comunitario cuando es abordado con visión social.

Y hablamos de un abanico porque, de acuerdo con la escala de tenencia de animales, hay una alternativa de aplicación. Así, por ejemplo, cuando se tiene una sola vaca para obtener leche para el consumo familiar, el estiércol es una gran materia prima para obtener insumos agrícolas de apoyo a las demás labores rurales, como son la elaboración de plaguicidas, fungicidas y mejoradores de suelo orgánicos. Por el contrario, en establos grandes, donde cada centavo de inversión es manejado financieramente y donde el volumen de estiércol diariamente rebasa la mano de obra disponible, el abanico tecnológico actual puede fácilmente

Sólo una tercera parte de los compuestos base carbón (carbohidratos) y no más de una cuarta parte de los compuestos nitrogenados (proteínas) son incorporados al organismo del animal y su metabolismo

tener alternativas para generar nuevos productos o reducir costos de energía y fertilización.

Sólo es cuestión de dedicar unos minutos para permitirse cambiar el enfoque y ruta de razonamiento de lo que representa el estiércol en la producción láctea. Es decir, lo que actualmente llamamos romper paradigmas.

Así que empecemos con un enfoque diferente. ¿Quién en su sano juicio compraría un kilogramo de azúcar, usaría unos doscientos gramos para endulzar un par de litros de agua para bebida y tiraría a la basura los restantes 800 gramos? ¡O aún peor! ¿Quién de un kilo de carne magra rutinariamente sólo guisaría 100 gramos y 900 gramos los dejaría podrirse sin obtener ningún beneficio? Bueno pues, aunque revelador y poco creíble, esto sucede diariamente en los corrales de los establos. Por supuesto que literalmente no usamos producto tan refinado como el azúcar para dárselo a las vacas, pero hablando energéticamente, a diario sí dejamos de aprovechar la energía que con mucho esfuerzo o dinero se adquiere o produce y se destina para el consumo de las vacas, ¡hablamos de los carbohidratos de los forrajes y granos que diario están en la pastura y concentrados del alimento! Insumos que gracias al nutriólogo se adicionan lo más balanceado posible para que sean aprovechados por los animales y su microbiota ruminal.

Pero sabiamente la naturaleza no permite que todos los carbohidratos se queden en esta fase de digestión, pues escasamente una tercera parte de los compuestos base carbón (carbohidratos) y no más de una cuarta parte de los compuestos nitrogenados (proteínas) son incorporados al organismo del animal y su metabolismo. Pues, desde el punto de vista de un ciclo natural de los elementos, estos compuestos nitrogenados y carbohidratos deben pasar por varias fases y estratos bióticos (microbios, plantas,

animales) y abióticos (suelo, agua, aire) para generar la diversidad de vida y asegurar la continuidad evolutiva en nuestra biosfera.

¡Cierto, estamos hablando del estiércol! Entonces, si es un proceso tan natural, ¿por qué genera tanta incomodidad y controversia? Éste es el punto de inflexión donde es necesario romper paradigmas: si no hacemos ningún manejo del estiércol, sino sólo apilarlo, claro que la naturaleza se encargará de disponer de él, sólo que dependiendo del volumen y lugar de almacenamiento generará demasiadas incomodidades, como malos olores, moscas y fauna nociva. Por otra parte, por el tipo de descomposición también genera contaminantes que van al aire en forma de gases, principalmente de metano, amoníaco y óxido nítrico; escurrimientos que contaminan aguas superficiales y profundas con varios compuestos, destacando nitritos y fosfatos.

Esto muchas veces es difícil de creer, pues ¿cómo es que siempre ha existido el estiércol y hasta ahora hablamos de contaminación? En este sentido hay parte de razón, pues el estiércol en sí no es un contaminante tal cual, sino sólo una fase del ciclo de los nutrientes en la naturaleza. Sólo que el amontonar el estiércol es producto del confinamiento de los animales y no del comportamiento natural del ganado. Por lo que, la falta de dispersión del estiércol, como sucede con frecuencia en los establos, fuerza a la naturaleza a tomar rutas bioquímicas con excesos de compuestos que escapan a un reciclamiento y por su cantidad pasan a ser contaminantes.

Atendiendo este par de simples principios: el estiércol es un conglomerado de nutrientes puestos en condiciones ideales (microorganismos, humedad y tamaño de partícula) para generar insumos benéficos al suelo y las plantas o para extraer la energía almacenada en ellos, es que se

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los sistemas de aprovechamiento del estiércol en establos lecheros

Sistema	Descripción/ requisitos	Condición/ Recomendación de uso	Retos	Beneficios	Grado de Des©
Estercolero permanente	Rincón dentro o fuera de los corrales del ganado.	Comúnmente suelo desnudo y sujeto al clima/ hasta 30 ¹ ton/ha.	Moscas y fauna nociva, olores, emisiones, inocuidad.	Baja/nula inversión.	Participa hasta con 52% de los GEI y 50% de PE de la UP.
Estercolero a pie de surco	Remoción de corrales y amontonamiento cerca del terreno de cultivo.	Se deja a pie de surco entre uno y seis meses sin dispersar/ hasta 30 ¹ ton/ha.	Emisiones al aire y pérdida de valor fertilizante.	Menos moscas y olores.	Participa con hasta 35% de los GEI y 30% de PE de la UP.
Composta estática	Estiércol + otros residuos orgánicos en suelo impermeable con al menos una mezcla/ vuelta cada seis meses.	Colección y reúso de lixiviados, control de humedad y temperatura/ de 5 a 10 ¹ ton/ha.	Moscas, olores, reúso de lixiviados.	Menor sobrevivencia de patógenos.	Participa con 10% a 20% de GEI y de 20 a 10% del PE de la UP.
Composta dinámica	Como composta estática + control permanente de aerobiosis.	Control semanal de temperatura, humedad, mezclado/ de 1 a 5 ¹ ton/ha.	Comercializar lixiviados. Mecanización del proceso.	Nulos patógenos, valor comercial de lixiviados y mejorador de propiedades físicas del suelo.	Participa con 10% a 2% de GEI y puede contribuir al secuestro-C en suelo.
Dispersión diaria/ semanal en terrenos de cultivo forrajero	En superficie agrícola-forrajera con transporte e implementos o M.O. para dispersión.	En áreas de corte escalonado de forrajes perennes/ 5 a 20 ¹ ton de estiércol fresco/ha.	Superficie continua para simbra, exceso de fósforo.	Aporte de 30% al 100% de N necesario.	Participa con 10% a 2% de GEI y hasta con 30% y 100% del nitrógeno y fósforo fertilizante, en balance y puede contribuir al secuestro-C en suelo.
Almacenamiento en laguna de oxidación	Oquedad en el terreno de la UP.	Comúnmente suelo desnudo y sujeto al clima, con alta evapotranspiración/ hasta 30 ¹ ton líquidas/ha.	olores, emisiones, filtraciones al subsuelo, sobrevivencia de patógenos.	Baja/nula inversión.	Participa con hasta el 52% de los GEI y 50% de PE de la UP.
Digestor anaerobio sin mechero activo y laguna sin control	Reactor cerrado con capacidad de 30 a 60 días de descargas, con quemador de gas y laguna de efluentes.	Sin control del uso del biogás y efluente/ 1m ³ de biogás en el aire equivale al biogás del rumen de dos vacas.	Instalar calderas o equipo que usen biogás y fertilización líquida de cultivos forrajeros.	Reducción de olores y moscas, se mantiene el riesgo con patógenos.	Incrementa hasta el 100% las emisiones de GEI y contribuye con el 50% del PE de la UP.
Digestor anaerobio con mechero activo y laguna controlada	Igual a la descripción del digestor anterior, pero con uso y/o aprovechamiento de biogás y efluente.	Documentación del uso del biogás y efluente/ de 2 a 2.3 m ³ de biogás equivale a 1 kg gas butano y de 1 a 50 ¹ ton líquidas/ha.	Instalar calderas o equipos que usen biogás y fertilización líquida de cultivos forrajeros.	Reducción de olores y moscas, se mantiene el riesgo con patógenos.	Reduce hasta 30% las emisiones de GEI y contribuye hasta con 30% de la fertilización de la UP.

Des©: Descarbonización; **GEI:** Gases con Efecto Invernadero; **PE:** Potencial de Eutrofización; **UP:** Unidad de Producción; **1:** la cantidad de aplicación varía de acuerdo con el contenido de nitrógeno y fósforo. Las equivalencias de impacto y aprovechamiento son promedios de múltiples evaluaciones obtenidas por el autor mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ISO14040) en México y adecuadas para este capítulo.



debe proceder para contribuir con el manejo del estiércol a la descarbonización del sector lácteo. Y se puede realizar como oportunidad de negocio o como parte de la economía circular *in situ*, local o regional.

Oportunidades para el aprovechamiento del estiércol en establos lecheros

La forma más lógica y simple de aprovechar el manejo del estiércol en los establos lecheros es incorporarlo a los mismos elementos de producción que ya se tienen como unidad de producción, es decir, dispersarlo en los terrenos de cultivo de forraje que obligadamente requieren las unidades lecheras, ya sea terrenos propios, comunales, rentados o en convenio. Ésta es la forma más natural, económica y de menor impacto de aprovechar no sólo la capacidad fertilizante del estiércol, sino también de contribuir con el secuestro o reciclamiento del carbón en el suelo y de reducir su fermentación dirigida a producir GEI.

Alternativamente y de acuerdo con las posibilidades de cada establo, se pueden implementar tecnologías alternativas; sin embargo, como se aprecia en el cuadro 1, en la medida que nos alejamos del manejo que simula el ciclo natural del estiércol, es imposible no tener emisiones al aire y agua, pero también es posible aprovechar económicamente el valor fertilizante, germicida y energético de insumos que inicialmente fueron un costo fijo del establo. Además, cada tecnología tiene sus propios retos, no sólo por la inversión en tiempo y recursos económicos que requiere, sino que su implementación sin manejo y mantenimiento continuo pueden ser contraproducentes en cuanto a daño al ambiente.

Se podría concluir que el adecuado manejo del estiércol en los establos lecheros es la estrategia inmediatamente disponible con un amplio abanico de tecnologías para contribuir en la descarbonización del sector y abonar a la resiliencia de los predios forrajeros ligados a la producción láctea en México.

El ciclo natural de los compuestos nitrogenados y carbohidratos (de los cuales está conformado el estiércol) pasan por varias fases y estratos bióticos (microbios, plantas, animales) y abióticos (suelo, agua, aire) para generar la diversidad de vida y asegurar la continuidad evolutiva en nuestra biosfera

Referencias

Hernández, M. 2021. Gases de efecto invernadero. Altamente contaminante el sector pecuario: urge replantear estrategias. Gaceta UNAM 10, 23 agosto 2021. <https://www.gaceta.unam.mx/altamente-contaminante-el-sector-pecuario-urge-replantear-estrategias/>

INECC, 2018. México Sexta comunión nacional y segundo informe bienal de actualización ante la convención marco de las Naciones unidas sobre el cambio climático. <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/>

MANEJO DEL SUELO Y SECUESTRO DE CARBONO

Eva Aurora Bautista Calderon¹
Cristo Omar Puente Valenzuela¹
Guillermo González Cervantes¹
José Luis González Barrios¹
Gerardo Delgado Ramírez¹
Juan Estrada Ávalos¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA



El suelo es un recurso esencial para la vida en el planeta, debido a las múltiples funciones que desempeña tanto en los ecosistemas como en las actividades humanas

Introducción

El suelo es un recurso esencial para la vida en el planeta, debido a las múltiples funciones que desempeña tanto en los ecosistemas como en las actividades humanas. Su adecuado conocimiento permite mantener o mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, optimizando su uso y conservación; asegurando una producción agrícola saludable y equilibrada, mientras se minimiza el impacto ambiental. A menudo, el suelo es subestimado, aunque juega un papel fundamental en la regulación de procesos naturales, el mantenimiento de la biodiversidad y la producción agropecuaria.

En el contexto actual, el secuestro de carbono ha cobrado relevancia debido a la creciente preocupación por el cambio climático y sus efectos. En la búsqueda de soluciones para mitigar estos impactos, se ha identificado el potencial del suelo no sólo como base para la vegetación y la agricultura, sino también como un sumidero de carbono (C), a través de su secuestro a largo plazo. Los suelos pueden almacenar grandes cantidades de carbono, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y limitando el aumento de la temperatura global.

El carbono es un elemento esencial para la vida en la Tierra y circula continuamente entre la atmósfera, los océanos, la biosfera (plantas y animales) y la litósfera (suelo y rocas). Su importancia radica en sus implicaciones

ambientales, nutrimentales y económicas, ya que forma parte de los ciclos biogeoquímicos de una amplia gama de compuestos orgánicos, metabólicamente activos en distintos niveles tróficos de los ecosistemas. El suelo almacena aproximadamente tres veces más carbono que la atmósfera (800 Pg¹), con un contenido de 1,550 Pg de carbono orgánico y 750 Pg de carbono inorgánico a un metro de profundidad, además de cuatro veces más que la biomasa vegetal (550 Pg) (LaI, 2010; IPCC, 2013). El carbono orgánico del suelo mejora sus propiedades químicas, físicas y biológicas, lo que influye directamente en tres aspectos fundamentales: 1) calidad, 2) sustentabilidad y 3) capacidad productiva. El equilibrio del carbono depende de estos tres reservorios, pero factores como la temperatura, el clima, la vegetación, la materia orgánica, la actividad microbiana y el manejo del suelo influyen directamente en su dinámica y en el secuestro de carbono.

Para que el suelo actúe como sumidero de carbono, es necesario reducir su concentración en la atmósfera. Esto se logra a través de la fotosíntesis, proceso mediante el cual la vegetación convierte el CO₂ en compuestos orgánicos que forman tejidos vegetales. Cuando estos tejidos mueren, se incorporan al suelo en forma de residuos orgánicos, conocidos como materia orgánica. Ésta es descompuesta por microorganismos, transformándola en formas inorgánicas asimilables para las plantas y otros microorganismos. Las prácticas agrícolas inadecuadas han contribuido a la liberación de carbono

¹ 1Pg = 1x 10⁹ toneladas o 1Pg = mil millones de toneladas

Los suelos pueden almacenar grandes cantidades de carbono, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y limitar el aumento de la temperatura global

a la atmósfera, aumentando las emisiones de CO₂. Por ello, es crucial adoptar prácticas de manejo que aseguren la sostenibilidad y productividad del suelo, mejorando su estructura, fertilidad y salud, y promoviendo un ambiente propicio para el crecimiento de los cultivos.

México cuenta con una superficie aproximada de dos millones de kilómetros cuadrados y presenta una gran diversidad edáfica, alberga 25 de las 32 unidades de suelo propuestas por la Base de Referencia Mundial (INEGI, 2007). Esta diversidad le confiere diferentes aptitudes para diversas funciones y servicios ecosistémicos. Del total de la superficie del país, 10.5% se destina a la agricultura, pero sólo 10% de esta área tiene vocación agrícola. La actividad ganadera ocupa un porcentaje importante de la superficie total del país (Molina-Morejón *et al.*, 2020). Sin embargo, 71.9% del territorio nacional presenta algún grado de degradación, lo que impacta directamente en la productividad agrícola.

La adopción de prácticas sostenibles de manejo del suelo, como la labranza mínima y la incorporación de materia orgánica, puede mejorar su estructura, aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes, y fomentar el secuestro de carbono. Estas estrategias no sólo contribuyen a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de GEI, sino que también fortalecen la resiliencia de los sistemas agrícolas ante condiciones climáticas adversas. Sin embargo, dada la diversidad edáfica de México, su implementación debe adaptarse a las condiciones particulares de cada región.

Como respuesta a esta necesidad y en el marco de la conmemoración del Día Mundial del Suelo 2020, en México se impulsó la creación de un instrumento de política pública que incentive el manejo sostenible de los suelos agropecuarios. En 2022, se estableció la Estrategia

Nacional de Suelo para la Agricultura Sostenible (ENASAS), cuyo objetivo prioritario es promover y aumentar el manejo sostenible de los suelos agropecuarios mediante la conservación de sus funciones y la restauración de suelos degradados.

La implementación de estrategias de secuestro de carbono no sólo contribuye a la lucha contra el cambio climático, sino que también ofrece beneficios adicionales, como la mejora de la calidad del suelo, el aumento de la biodiversidad y el fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas ante eventos climáticos extremos. En este capítulo abordaremos algunas estrategias relacionadas con el manejo del suelo para la contribución de la recarbonización del mismo, mediante el secuestro de carbono, que han sido aplicadas y que se encuentran en proceso de investigación en la Comarca Lagunera, región Norte centro de México.

Comarca Lagunera: importancia y características de los sistemas productivos forrajeros en la industria lechera

En el norte del país, donde las condiciones climáticas son severas, prevalece la agricultura intensiva y tecnificada, caracterizada por la escasa disponibilidad de agua (240 mm de lluvia promedio anual) y el uso de sistemas de riego avanzados. Una de las regiones con mayor relevancia económica y agrícola es la Comarca Lagunera, conformada por municipios de Coahuila y Durango. Esta zona es la principal cuenca lechera de México, aportando 23% de la producción nacional (SIAP, 2023). Se caracteriza por su alta tecnificación en establos, alberga un hato ganadero de 976,430 cabezas destinadas a la producción de leche y carne (figura 1), generando 7.5×10^6 toneladas de excreta fresca al año, con un 12.3% de materia seca (MS), equivalente a 925,000 toneladas de estiércol seco (SIAP, 2024).

Figura 1. Establo ganadero de la Comarca Lagunera



De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAT), en el periodo 1990-2021 el sector ganadero fue el responsable de 16% de las emisiones de óxido nitroso (N_2O), dióxido de nitrógeno (NO_2) y metano (CH_4) a la atmósfera. Este tipo de gases se generan durante la gestión y el manejo del estiércol producido en la actividad ganadera; mientras que el CO_2 es generado por la tecnificación ganadera (Guzmán *et al.*, 2014). Una adecuada gestión de las deyecciones del ganado lechero puede mitigar el impacto ambiental al reducir el uso de fertilizantes minerales, como nitrógeno (N) y fósforo (P), y disminuir el consumo de energía mediante la producción de biogás. Así como secuestrar el carbono en el suelo al aplicar el purín y el estiércol como fertilizantes orgánicos. Esto permite aumentar la materia orgánica y la recuperación de nutrientes en el suelo y mejorar su disponibilidad para los cultivos. Otro factor importante en la región es la producción de forraje. Es clave en la alimentación del ganado, incluyendo alfalfa, ensilajes de maíz y sorgo, así como cultivos de invierno (avena, trigo y triticale) (figura 2).

El riego en estos cultivos varía según el suelo, y la región emplea diversos sistemas de irrigación, destacando el riego por gravedad (80% de la superficie regada) (figura 3).

La disponibilidad de agua proviene de fuentes superficiales como las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, además de pozos subterráneos.

La generación de residuos provenientes de la excreta del ganado bovino, limitaciones hídricas y la degradación de los suelos provoca severos problemas ambientales de contaminación del suelo y agua, además de emitir gases a la atmósfera; razón por la cual, en los últimos años se han realizado investigaciones relacionadas con estrategias que permitan mitigar los impactos generados por la industria lechera. Estos esfuerzos están siendo encaminados a la recarbonización del suelo mediante el secuestro de carbono y la descarbonización de la industria lechera mediante la disminución de la huella de carbono.

1. Sistemas de labranza y labores culturales para el secuestro de carbono

Como se mencionó anteriormente, el suelo juega un papel fundamental en el cambio climático. Dependiendo de su manejo, puede actuar como sumidero de carbono o, por el contrario, convertirse en una fuente emisora importante de CO_2 a la atmósfera. La recarbonización del suelo, mediante prácticas como la labranza mínima, la aplicación de enmiendas orgánicas y la gestión eficiente del riego, es una

Figura 2. Cultivo de maíz forrajero y alfalfa sembrados en la Comarca Lagunera



Figura 3. Sistemas de riego (pivote central y válvula alfalfera) utilizados en la Comarca Lagunera



La recarbonización del suelo, mediante prácticas como la labranza mínima, la aplicación de enmiendas orgánicas y la gestión eficiente del riego, es una estrategia clave para incrementar el secuestro de carbono y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero

estrategia clave para incrementar el secuestro de carbono y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la Comarca Lagunera. Estas prácticas no sólo mejoran la fertilidad del suelo y la calidad del agua, sino que también fortalecen la resiliencia de los sistemas productivos frente a las variaciones climáticas.

Uno de los principales enfoques analizados en este capítulo es la labranza mínima. Los diferentes sistemas de labranza surgieron a partir de la década de 1950 como apoyo a una agricultura cada vez más mecanizada e intensiva para la producción de forrajes (Chancellor, 1991). Sin embargo, el uso continuo de maquinaria agrícola y las operaciones mecánicas han generado la degradación del suelo al modificar la estructura de sus capas superficiales, provocando una mayor compactación. Estos cambios pueden analizarse y cuantificarse mediante la evaluación de la abundancia y distribución del espacio poroso.

En la Comarca Lagunera se cultivan aproximadamente 113 mil hectáreas anualmente, de las cuales 47% corresponde a cultivos forrajeros (SIAP, 2023), siendo el maíz forrajero uno de los más importantes debido a su uso en la producción de ensilaje. Estudios realizados en la región han demostrado que la labranza mínima es una opción viable para los productores, ya que reduce los costos de producción en aproximadamente 20%. Además, promueve la acumulación de residuos agrícolas a lo largo del tiempo, lo que se traduce en un incremento significativo de materia orgánica en el suelo. Esto se refleja en una mayor concentración de nitrógeno y carbono orgánico, pasando de un 0.5% en suelos con labranza tradicional a más de 3% en suelos con labranza mínima (Trejo-Escareño, 2003). Adicionalmente, este sistema permite un ahorro de hasta un 18% en el volumen de agua de riego y mejora

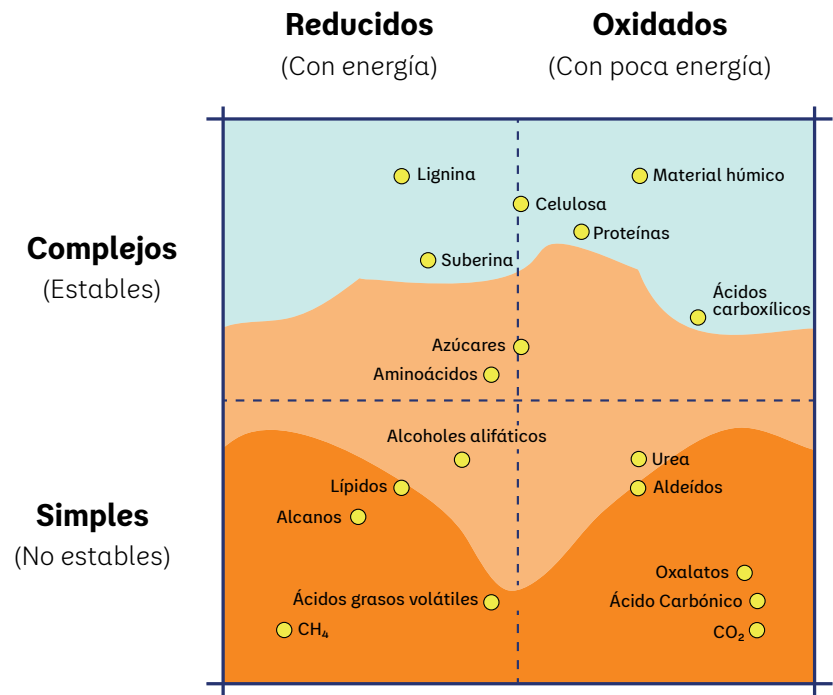
la estabilidad estructural del suelo al incrementar la porosidad de tamaño mediano (0.02 a 0.1 mm²) y grande (2 a 10 mm²). Esto protege la atmósfera en el medio poroso, lo que contribuye a mantener el carbono orgánico secuestrado por más tiempo y a optimizar la productividad del agua de riego (González-Cervantes *et al.*, 2004).

2. Reutilización de purines hacia la recarbonización del suelo

Existen diferentes prácticas enfocadas en el manejo adecuado del suelo, el uso eficiente de fertilizantes de síntesis química y la concientización sobre el uso del recurso agua. Una de las prácticas más útiles y beneficiosas es el uso de enmiendas orgánicas derivadas de purines generados en la producción lechera. Esta estrategia no sólo permite el aprovechamiento de los nutrientes y minerales presentes en los purines, sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono al recarbonizar el suelo.

El carbono es elemento clave a nivel mundial debido a sus implicaciones ambientales, nutrimentales y económicas. Su ciclo biogeoquímico da lugar a una amplia gama de compuestos orgánicos metabólicamente activos en distintos niveles tróficos de los ecosistemas. La clasificación del carbono varía según el contexto; en este caso, se considerará desde dos perspectivas: 1) complejidad molecular o tamaño y 2) contenido energético o biodegradabilidad. Estas características permiten estimar la persistencia del carbono en el ambiente (Gunina y Kuzyakov, 2022; Wang y Kuzyakov, 2024). En el caso del estiércol bovino, su contenido de carbono está compuesto por un 14% de hemicelulosa, 15% de celulosa y 7% de lignina (Maillard y Angers, 2014). Es decir, el carbono contenido en la excreta del ganado vacuno está constituido por compuestos orgánicos simples (no estables) y complejos

Figura 4. Compuestos orgánicos simples (no estables) y complejos (estables), con diferentes estados de óxido-reducción



(estables), que presentan diferentes estados de oxidación, lo que da como resultado su nivel de complejidad molecular y su permanencia en el suelo (figura 4).

Una estrategia para incrementar la permanencia del carbono orgánico en el suelo es someterlo a procesos biológicos que faciliten su metabolización. Los forrajes utilizados en la alimentación del ganado atraviesan al menos dos procesos biológicos:

1) Metabolización en el rumen: durante la digestión, las moléculas complejas se fragmentan para su asimilación y conversión en energía.

2) Compostaje pasivo: la excreta del ganado se somete a un proceso de composteo pasivo (a la intemperie y con volteos ocasionales para su aeración).

Este proceso promueve la oxidación de los compuestos orgánicos antes de su incorporación al suelo, lo que aporta una diversidad de moléculas con diferentes niveles de persistencia y fortalece las distintas reservas de carbono orgánico (FAO, 2017). De acuerdo con la FAO, las reservas de carbono orgánico en el suelo se clasifican en:

1) Fracción lábil o activa, que se caracteriza porque después de la incorporación de carbono orgánico fresco al suelo, la descomposición da lugar a la pérdida de una gran proporción de la biomasa inicial en uno a dos años.

2) Fracción intermedia, que contiene carbono orgánico procesado por microbios que está parcialmente estabilizado en superficies minerales y/o protegido dentro de agregados, con tiempos de rotación en el rango de 10 a 100 años.

3) Reserva lenta en donde el carbono orgánico del suelo se encuentra estabilizado por lo que los periodos de rotación son muy lentos, de 100 a > 1000 años.

En la Comarca Lagunera, en el INIFAP CENID-RASPA se han realizado estudios donde se observa que mediante la aplicación de purines se logra conservar niveles de materia orgánica hasta en un 3.4% y se contribuye en la estructura del suelo al mantener densidades aparentes de 1 a 1.1 g cm⁻³ en predios productores de maíz forrajero de forma intensiva después de nueve a diez años de uso continuo de esta enmienda orgánica a base de estiércol bovino, lo cual ha mantenido la fertilidad del suelo en relación a seis elementos (nitrógeno, fosforo, potasio, hierro, manganeso y cobre) indispensables para el desarrollo de las plantas. Esto significa un ahorro en los costos de la aplicación de fertilizantes químicos que elevan los costos de producción de forrajes para las vacas lecheras (González-Barrios *et al.*, 2021). También se han optimizado los riegos tomando en cuenta esta mayor disponibilidad de agua en el suelo con un ahorro (de al menos 10%) en el suministro de agua

de riego, que es muy importante para disminuir la huella hídrica y de carbono en la producción de forrajes para el ganado lechero.

Además, se han realizado los primeros estudios preliminares de la cuantificación de los reservorios de carbono orgánico en el suelo bajo cultivo de maíz forrajero, donde se aplicaron purines con diferente proceso de estabilización, como lo es la vermicomposta y composta (figura 5).

Se observó un impacto significativo a una profundidad de 60 cm. Los resultados mostraron que la aplicación de vermicomposta resultó en un almacenamiento de carbono orgánico de 37.3 Ton C ha⁻¹, seguido de la composta con 15.23 Ton C ha⁻¹. En contraste, los suelos que recibieron fertilización química tradicional (NPK + MgO + ME) sólo reportaron valores de 5.97 Ton C ha⁻¹ (Nava-Reyna *et al.*, 2017). Dichos valores demuestran el potencial de la aplicación de purines al suelo.

Actualmente, se desarrollan investigaciones sobre el perfil oxidativo del carbono orgánico para cuantificar las reservas de carbono en el suelo. De manera que se está en la antesala de proponer paquetes tecnológicos que permitan la recarbonización del suelo. Un predio agropecuario cooperante, ubicado en el municipio de Torreón, Coahuila, ha utilizado riego con efluentes deri-

vados de la biodigestión de purines para sus parcelas, durante los últimos diez años (figura 6).

Esto ha permitido la incorporación de carbono altamente procesado biológicamente al suelo. Este tipo de carbono presenta una mayor resistencia e inercia química, lo que significa que su contenido energético es bajo y, por ende, menos susceptible a la degradación microbiana. Como resultado, se favorece su acumulación y transporte vertical en el perfil del suelo.

Mediante la exploración de todo un perfil de suelo (0-120 cm) se pudo notar el comportamiento del contenido de carbono orgánico en el suelo y cómo la reserva tardía de carbono (en amarillo) incrementa su importancia relativa con la profundidad (en cuatro estratos de 30 cm hasta 120 cm), mientras que las fracciones medias y rápidas (representadas por los colores verde y azul, respectivamente) disminuyen (figura 7).

Este fenómeno sugiere que el efecto de acumulación de carbono de reserva lenta no sólo está relacionado con su estabilidad intrínseca, sino también con el aporte continuo de carbono de rápida asimilación (reserva rápida). Según Angst *et al.* (2024), los efluentes de biodigestores contienen una mezcla de estas fracciones, lo que genera una mayor actividad microbiana sobre la fracción rápida, permitiendo

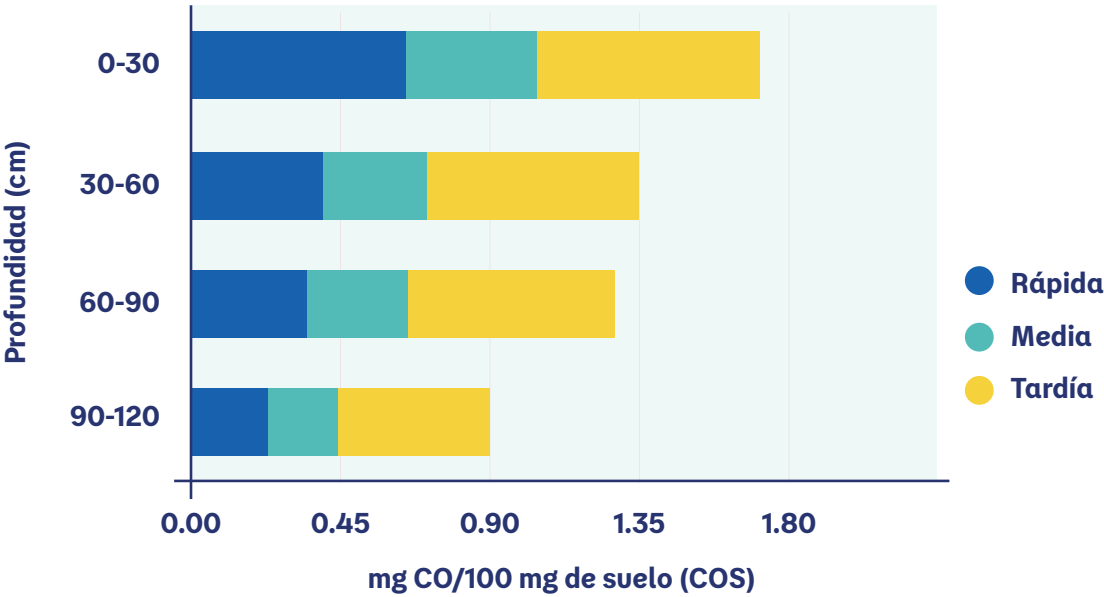
Figura 5. Purines con diferente estado de estabilización. Vermicomposta (izquierda) y composta (derecha)



Figura 6. Efluentes derivados de la biodigestión de purines



Figura 7. Reservas de carbono orgánico del suelo (COS) del predio agropecuario cooperante





que la fracción lenta se acumule y sea transportada verticalmente en el suelo. Poder cuantificar estas reservas de carbono orgánico permite entender el impacto que tienen en el suelo, es decir, la reserva rápida es un indicador de las propiedades químicas y físicas del suelo. Mientras que la reserva lenta sirve como un indicador en términos de secuestro de carbono orgánico a largo plazo (FAO, 2017).

Conclusiones

La descarbonización de la industria lechera mediante la recarbonización del suelo requiere un manejo eficiente

de los purines, aplicándolos de manera sostenible al suelo y combinándolos con prácticas como la labranza mínima para conservar la materia y el carbono orgánicos. Asimismo, el uso de sistemas de riego eficientes, como la válvula alfalfa, el pivote central y el goteo, contribuyen a mejorar la sostenibilidad del sistema de producción de forrajes para los bovinos de leche.

En este contexto, el manejo adecuado del suelo y el secuestro de carbono se presentan como estrategias clave para reducir la huella de carbono de la producción lechera en México, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes.

Referencias

- Angst, G., Potapov, A., Joly, F. X., Angst, S., Frouz, J., Ganault, P., & Eisenhauer, N. (2024). Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter. *Nat Commun*, 15(1), 5005. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49240-x>
- Chancellor, W.J. (1991). Compaction of soil agricultural equipment. Bulletin 1991 University of California Davis. USA.
- FAO. (2017). *Carbono orgánico del suelo el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.
- González, B.J.L., Rivera, T. A., Mesta, N.A., Nava, R.E., Constante, G.V. (2021). Densidad aparente como indicador de la calidad del suelo en sistemas intensivos de producción forrajera con uso de enmiendas orgánicas. In: Uresti Gil, J. y L. Reyes Muro. (Compiladores): Memorias de la LVI Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Ciudad de México. SADER INIFAP Nov. 2021 pp. 2-5.
- Gunina, A., & Kuzyakov, Y. (2022). From energy to (soil organic) matter. *Glob Chang Biol*, 28(7), 2169-2182. <https://doi.org/10.1111/gcb.16071>
- González, C.G., Sánchez, C.I., García, A.D. (2004). La porosidad del suelo mediante el análisis de imagen en huertas de nogal pecanero (karya illinoensis, koch) región norte de México. *Revista Interamericana Terra*, 22(3), 279-287.
- Guzmán, M., Veneciano, J., y Sager, R. (2014). Emisión de gases en un sistema ganadero intensivo. RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 40(3), 269-275.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI) (2007). Conjunto de datos vectorial edafológico. INEGI. Mapas. Edafología. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- IPCC, (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M].
- LaI, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60 (9), 708-72. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- Maillard, E., & Angers, D. A. (2014). Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Glob Chang Biol*, 20(2), 666-679. <https://doi.org/10.1111/gcb.12438>
- Molina V., Molina V., Espinoza J., Contreras J., y López A. (2020). Viabilidad técnica y económica del uso de calentador comercial de agua a base de biogás en establos lecheros. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 11(2), 391-403. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2078>
- Nava, R.E., Constante, G.V., Gonzalez, B.J., Salazar, M.I., Guerra, R.A., Santellanez, A.K., Gonzales, C.G y Muñoz, V.J. (2017). Efecto de la aplicación de composta y vermicomposta en el potencial de secuestro de carbono de suelos agrícolas del norte-centro de México. *Revista AGROFAZ*, 17(2), 137-147.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2024. Avance mensual de la producción pecuaria 2020. http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceEdo.jsp (Acceso enero 2025).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Acceso enero 2025).
- Trejo, E., Salazar, S. E., Lopez, M.J., Vazquez, V.C. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista Mexicana de ciencias Agrícolas*, 1(5), 727-738.
- Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). "Energy and enthalpy" for microbial energetics in soil. *Global Change Biology*, 30(2). <https://doi.org/10.1111/gcb.17184>

ESTRATEGIAS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN INTENSIVA LECHERA EN MÉXICO

Karla Rodríguez Hernández¹

Juan Isidro Sánchez Duarte¹

Arturo Reyes González¹

Antonio Anaya Salgado¹

Gregorio Núñez Hernández²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,
Campo Experimental La Laguna, Coahuila, México

²Facultad de Agronomía y Zootecnia,
Universidad Juárez del Estado de Durango



La huella hídrica es un indicador de la cantidad de agua requerida o empleada para generar un producto que termina en manos de un consumidor. Se divide en tres componentes: azul, verde y gris

Introducción

El aumento en la población humana ha llevado a una creciente demanda de alimentos. Asimismo, el cambio de ecosistemas naturales a agroecosistemas ha ocasionado diferentes efectos negativos en el medio ambiente, como son la substitución de la vegetación natural, pérdida de la cubierta vegetal, disminución en la productividad del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pérdida de biodiversidad y desequilibrio en los ciclos naturales. Se prevé que para producir una mayor cantidad de alimentos que requiere la creciente población (energía, proteína, grasa), se seguirá intensificando el uso de recursos e insumos para la agricultura en más de 50% y la consecuente emisión de gases de efecto invernadero.

Ante esta situación, se han propuesto variados enfoques para reducir el impacto de las actividades agropecuarias en el medio ambiente, como son la agricultura sostenible, agricultura ecológica, agricultura orgánica, de la granja a la mesa, entre otros. Dichas propuestas tratan de integrar los aspectos productivos, ecológicos, sociales y económicos con el propósito de cubrir las demandas de productos y servicios a la población con un menor costo en el uso de recursos e impactar menos el medio ambiente y así asegurar la sustentabilidad de las generaciones venideras.

Dentro de estos enfoques se ha utilizado el concepto de huella ecológica, mediante el cual es posible relacionar la producción y el uso de los recursos naturales (Vanham *et al.*, 2019). Actualmente, se ha desarrollado información

sobre las huellas hídrica, de carbón, nitrógeno, fósforo, energía, tierra, biodiversidad y ecológica, entre otras.

La huella hídrica es un indicador de la cantidad de agua requerida o empleada para generar un producto que termina en manos de un consumidor. El cálculo de este volumen de agua se realiza mediante su medición a través de los varios eslabones de la cadena de producción. Con relación a la huella hídrica para la producción de cultivos a nivel global, se reporta que la huella hídrica ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$) promedio fue de 1,028, 1,292, 1,486 y 1,620 para granos de maíz, cebada, arroz y trigo, respectivamente. En el caso de la soya fue de 2,107, mientras que para papa fue de 224 m^3 de agua t^{-1} . Para frutales, de 460, y para oleaginosas de 2,908 m^3 de agua t^{-1} (Mekonnen y Hoekstra, 2014).

En productos de origen animal, alrededor de 98% de la huella hídrica se relaciona con el uso de agua para la alimentación del ganado. La huella hídrica global de la producción animal estimada en 2010, era de 2,422 billones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ dividida en 87% verde, 6% azul y 7% gris. Para su estimación, la huella hídrica se divide en tres componentes: azul, verde y gris. La huella hídrica azul corresponde al volumen de agua superficial y subterránea. La huella hídrica verde corresponde al volumen de agua de lluvia y evapotranspiración. Finalmente, la huella hídrica gris es el volumen de agua que se recicla y descarga al ambiente, pero que mantiene estándares de calidad establecidos para su uso (Hoekstra, 2012).

Un tercio de este total se relacionó con el ganado vacuno de carne y otro 19% con el ganado lechero. En el caso

de productos animales, la huella hídrica ($\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$) fue de 3,265 en el caso del huevo, de 4,325 para carne de pollo y 15,415 para carne de res. En el caso de la leche, la huella hídrica fue de $1,020 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ (Mekonnen y Hoekstra, 2010).

Existen dos factores determinantes en la huella hídrica de los productos animales; el primero, la eficiencia de conversión alimenticia, que mide la cantidad de alimento para producir una cantidad dada de carne, huevos o leche, y el segundo factor es la composición del alimento que consumen los animales en cada sistema (Gerbens-Leenes *et al.*, 2011). Cuando aumenta la cantidad de concentrados en la dieta de los animales, también aumenta la huella hídrica, ya que los alimentos concentrados tienen una huella hídrica relativamente grande (en general, cinco veces mayor), comparada con la de los forrajes (pastos, residuos de cultivos y cultivos forrajeros) que tienen una huella hídrica relativamente pequeña (Hoekstra, 2012).

La huella hídrica en sistemas de producción de leche

Específicamente para la estimación de la huella hídrica del eslabón de la cadena que representa la producción de leche en los establos, primero hay que destacar que las principales categorías que la afectan son el uso del agua para la producción de cultivos, el consumo voluntario de agua de los animales, mantener el confort de las vacas a través del enfriamiento de los animales y las instalaciones, el enfriamiento de la leche, las operaciones de saneamiento, incluida la higiene animal junto con la limpieza de las instalaciones, y la recolección y transporte de desechos (Naranjo *et al.*, 2020). El mayor porcentaje de la huella hídrica total de un producto de origen animal está constituido por el primer eslabón de la cadena: la producción del alimento para el animal (Hoekstra, 2012).

La huella hídrica varía considerablemente según la región de producción, la composición del alimento y el origen de los ingredientes del alimento. Rotz *et al.* (2021) estimaron que la huella hídrica azul de la producción de leche por regiones en Estados Unidos de América era para la región sureste de 19 a $171 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche corregida por grasa y proteína (LCGP); para la región noreste fue de 18.2 a 66.7 L kg^{-1} LCGP, para el medio oeste de 18.4 a 82 L kg^{-1} LCGP, 28 a 327 L kg^{-1} LCGP para la región central del sur, 47.2 a 402 L kg^{-1} LCGP para el noroeste, y de 103 a 324 L kg^{-1} LCGP para la región suroeste.

En otro estudio realizado en dos establos lecheros, uno con animales confinados y el otro en pastoreo, en el estado

de Georgia en Estados Unidos (región sureste del país), se estimó que anualmente se empleaban $22.7 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche corregida por energía (ECM) en el establo con los animales estabulados; y para la producción de leche con los animales en pastoreo, el consumo anual de agua fue de $60 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche ECM. Cuando eliminaron el agua empleada para la irrigación de los cultivos o la pastura, observaron que la producción de leche basada en pasturas emplearía $7 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche ECM, mientras que para la producción de leche estabulada el consumo de agua sería de $14 \text{ L de agua kg}^{-1}$ ECM (Belflower *et al.*, 2012).

En 2020, Naranjo y colaboradores estimaron que para producir $1 \text{ kg de leche ECM}$ en establos lecheros del estado de California en Estados Unidos, se requirieron en total $2,160 \text{ L de agua azul kg}^{-1}$ de leche ECM en 1964, y entre 217 a $256 \text{ L de agua azul kg}^{-1}$ de leche ECM en 2014. El mayor contribuyente tanto en 1964 como en 2014 fue el utilizado para los cultivos, que se estimó en un 98.2% del uso total de agua en 1964, y un poco menos, entre 92.5% y 93.2%, en 2014. La reducción en el uso del agua entre 1964 y el 2014 se atribuyó, principalmente, al progreso en el rendimiento debido a la mejora de la genética, la gestión de los cultivos y la eficiencia del uso del agua mediante prácticas de riego. Adicionalmente, la reducción en el uso de agua en el establo, en las categorías de consumo de agua por los animales y agua para la limpieza de la sala de ordeño y enfriamiento de la leche, se atribuyó a la mejora en la producción de leche por vaca en 2014 y a las mejoras en el equipo de ordeño como las bombas de vacío y los enfriadores de placas, lo que permitió que en un establo se utilice la misma agua para múltiples funciones.

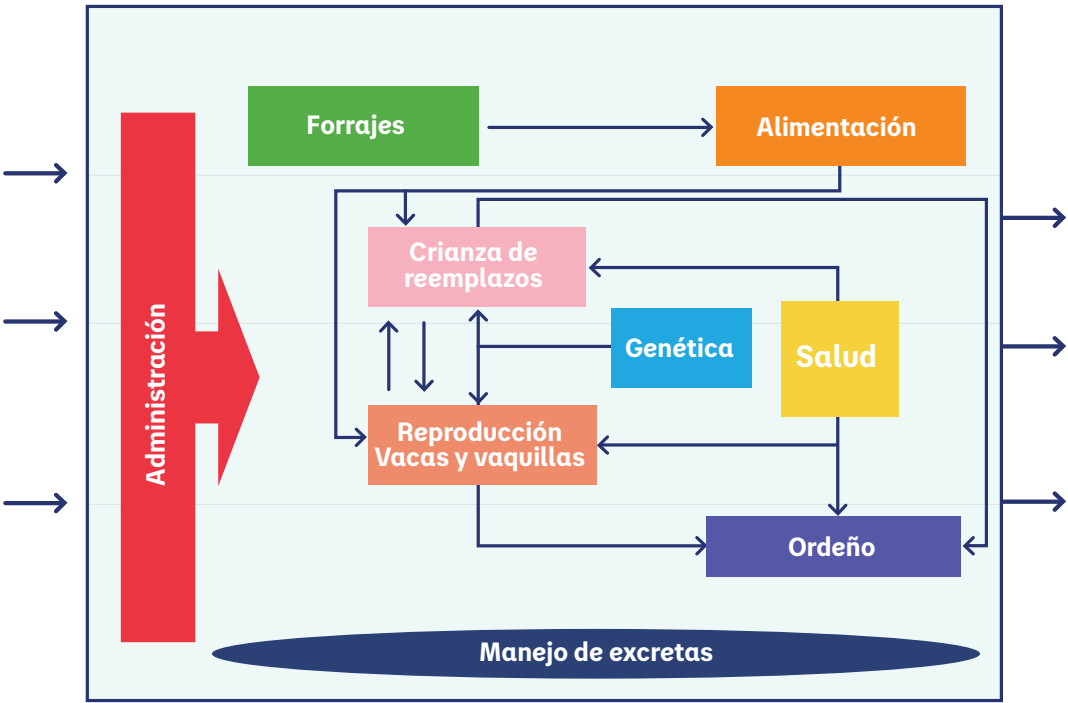
En México, para sistemas intensivos de producción de leche en ambientes cálido y templado, se realizó un diagnóstico del uso del agua de riego en la producción de forrajes para la alimentación del ganado y se estimó la cantidad de agua requerida para producir un litro de leche en las cuencas lecheras de la Región Lagunera y la de Aguascalientes, seleccionando una muestra de diez unidades de producción en cada cuenca. En La Laguna, se estimó que se utilizan $460 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche y para Aguascalientes $298 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche. Cuando se consideró toda la estructura del hato en los establos, esto es, número de vacas productoras, número de vacas secas y número de vaquillas y becerras, para la Región Lagunera se estimó un uso de $683 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche producida y en Aguascalientes, $515 \text{ L de agua kg}^{-1}$ de leche (Núñez *et al.*, 2012).

Uso del agua de riego en sistemas intensivos de producción de leche en México

El sistema de producción de leche en un establo, se encuentra compuesto por los siguientes procesos: manejo de forrajes, manejo de la alimentación, manejo reproductivo,

crianza de reemplazos, ordeño y salud. Cada uno de estos procesos se puede evaluar a través de indicadores, los cuales, inciden en el desempeño general del sistema. A continuación, se presentan un ejemplo de estos procesos y sus indicadores (figuras 1 y 2; cuadro 1).

Figura 1. Sistema de producción de leche en un establo y sus procesos

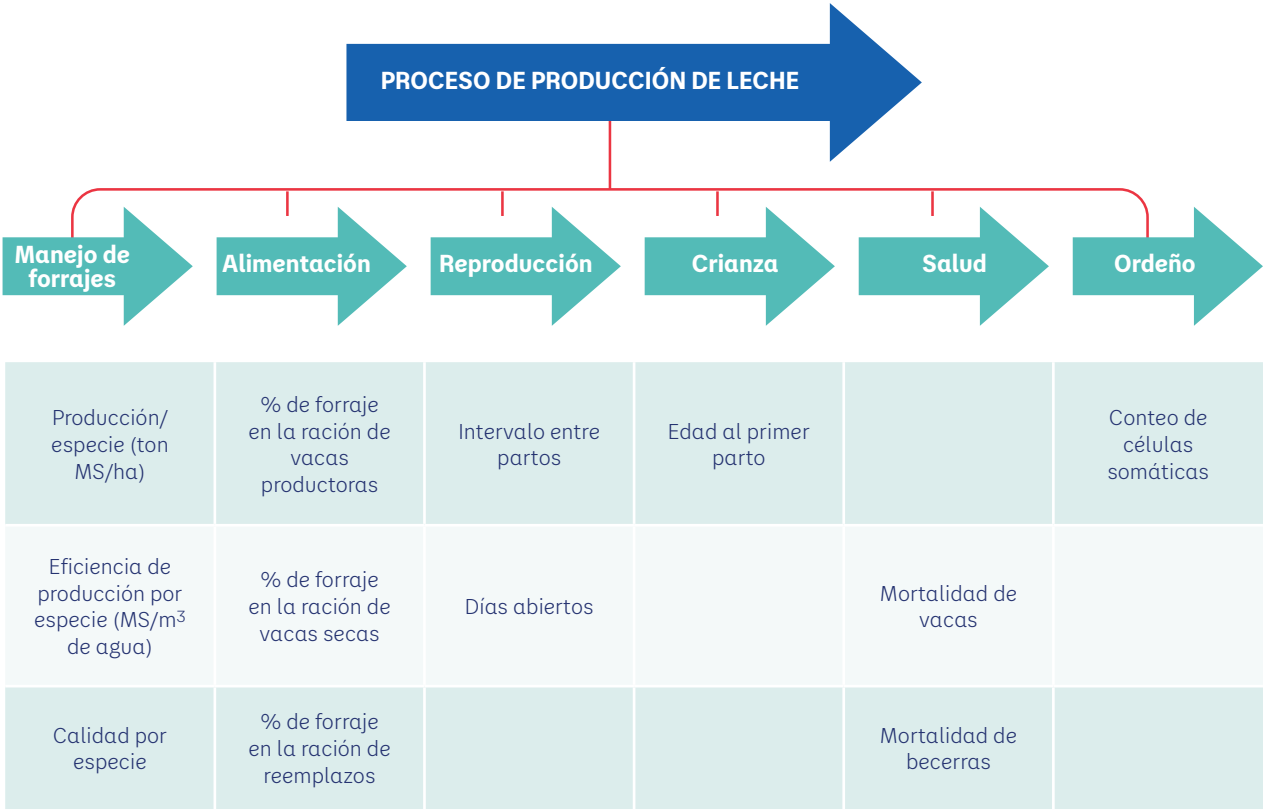


Cuadro 1. Indicadores de recursos y generales del sistema de producción de leche en un establo de producción intensiva

Indicadores de recursos del sistema					
Producción de forrajes	Gasto de agua de riego (Lps ¹)		Superficie de forrajes (ha)	Disponibilidad de agua (Lps ha ⁻¹)	
Indicadores generales del sistema					
Estructura del hato	Número total de cabezas	Vacas en producción (%)	Vacas secas (%)	Vaquillas > 1 año (%)	Becerras < 1 año (%)
Producción de leche	Producción de leche (vaca ⁻¹ día ⁻¹)		Proteína en la leche (%)	Grasa en la leche (%)	

¹Lps = Litros por segundo de agua para riego.

Figura 2. Ejemplo de procesos en sistemas de producción de leche en un estable de producción intensiva y sus indicadores



Efecto del clima en los requerimientos hídricos de los cultivos forrajeros

El clima influye de manera directa en la producción y el rendimiento de los cultivos. La temperatura, la humedad, la precipitación y el viento son algunos de los principales factores climáticos que afectan a los cultivos (Chaves y Gutiérrez, 2017), ya que éstos impactan la producción de materia seca y sus necesidades hídricas.

Cada región presenta diferentes condiciones climáticas. En México, existen los siguientes tipos de clima principales: tropical, seco o árido y templado. En los cuadros 2 y 3, se muestran los resultados de un trabajo de investigación, donde se presenta la producción y requerimiento hídrico de cultivos forrajeros obtenidos de dos climas diferentes: árido y templado (Núñez *et al.*, 2012).

Cuadro 2. Producción de materia seca de forrajes en dos diferentes climas

Cultivo	Clima árido (Región Lagunera)	Clima templado (Aguascalientes)
	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹
Alfalfa	15	22
Maíz	18	25
Sorgo	20	-
Avena	10	12

Cuadro 3. Láminas de riego para cultivos forrajeros en dos diferentes climas

Cultivo	Clima árido (Región Lagunera)	Clima templado (Aguascalientes)
	Lámina de riego (mm)	Lámina de riego (mm)
Alfalfa	1800	1500
Maíz	700	500
Sorgo	650	-
Avena	550	400

De acuerdo con la información de los cuadros anteriores, la mayor producción de forraje y menor consumo de agua por los cultivos se presentaron en el clima templado (Aguascalientes). Esto se debió principalmente a las condiciones climáticas de la región, como temperatura y

precipitación, las cuales se muestran en las figuras 3 y 4. La temperatura promedio fue mayor en el clima árido (Región Lagunera) con respecto al clima templado. En cambio, en el clima templado la precipitación durante el año fue mayor (barras verdes).

Figura 3. Temperatura promedio y precipitación de un clima árido (Región Lagunera)

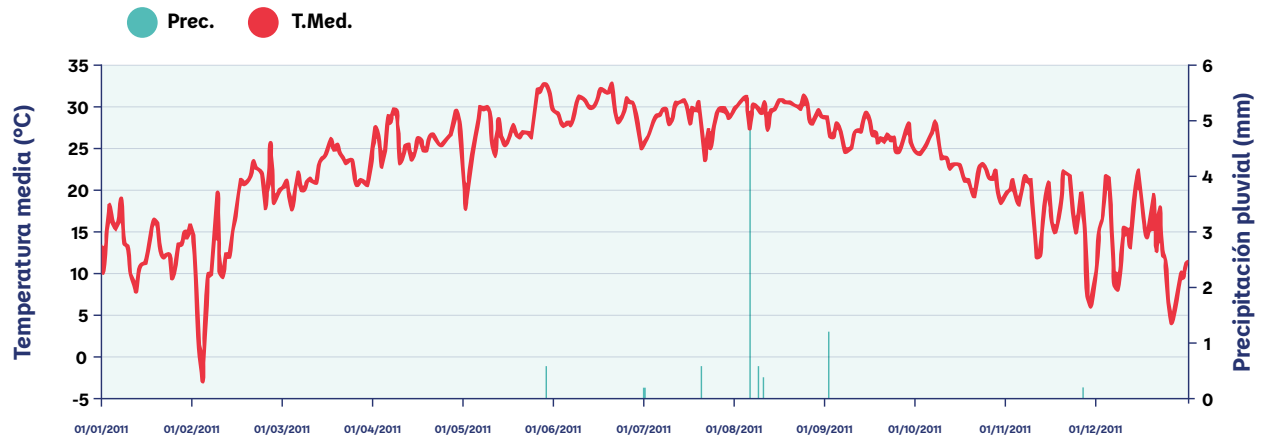
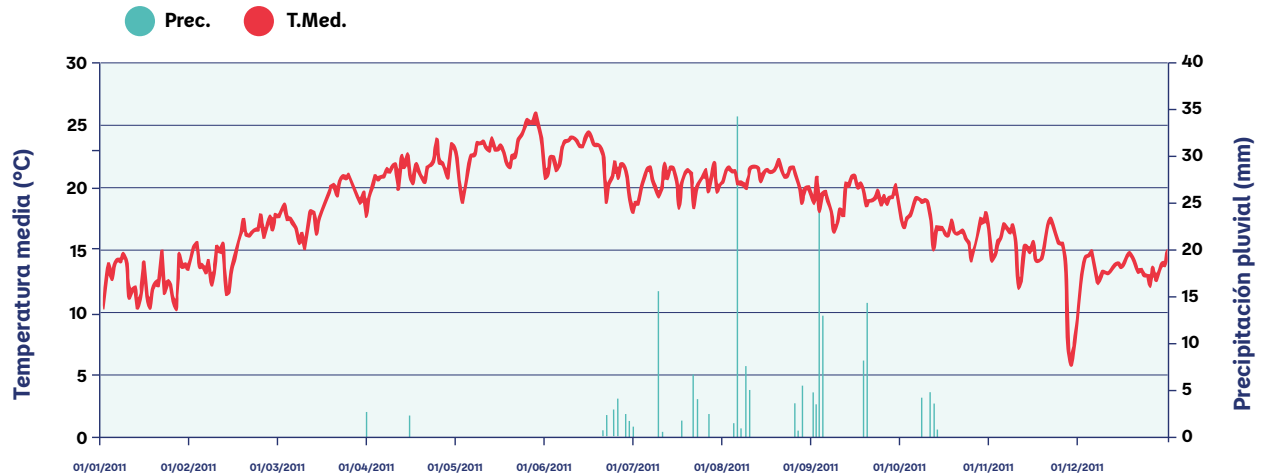


Figura 4. Temperatura promedio y precipitación de un clima templado (Aguascalientes)





La programación de los riegos de manera eficiente promueve que los rendimientos se incrementen en 20%, el ahorro de agua en 15% y la calidad del forraje en 10%

En las dos regiones anteriores, la alfalfa y el ensilado de maíz son los principales forrajes empleados para la alimentación de vacas productoras. Aunque en la Región Lagunera también se utilizan, en menor grado el ensilado de sorgo y los cereales de invierno como la avena (Núñez *et al.*, 2012).

En general, en el clima templado (Aguascalientes) se tuvo mayor producción de forraje (alfalfa, maíz y avena), con menor lámina de riego comparado con el clima árido. Esto se atribuyó a que en climas áridos o secos las altas temperaturas afectan de manera negativa el crecimiento y la productividad de las plantas, y en última instancia, los rendimientos. Por ejemplo, Reyes *et al.* (2024) llevaron a cabo una investigación durante cinco ciclos agrícolas de maíz forrajero con riego por goteo en la Región Lagunera, en el que se observó una relación negativa entre producción de forraje seco y temperatura máxima, donde el rendimiento de forraje seco disminuyó en 11% con riego por goteo y 20% con riego por gravedad al aumentar la temperatura ambiental de 30 °C a 38 °C, esto debido a que la temperatura óptima para el cultivo de maíz oscila entre 24 °C y 30 °C (Bannayan *et al.*, 2004).

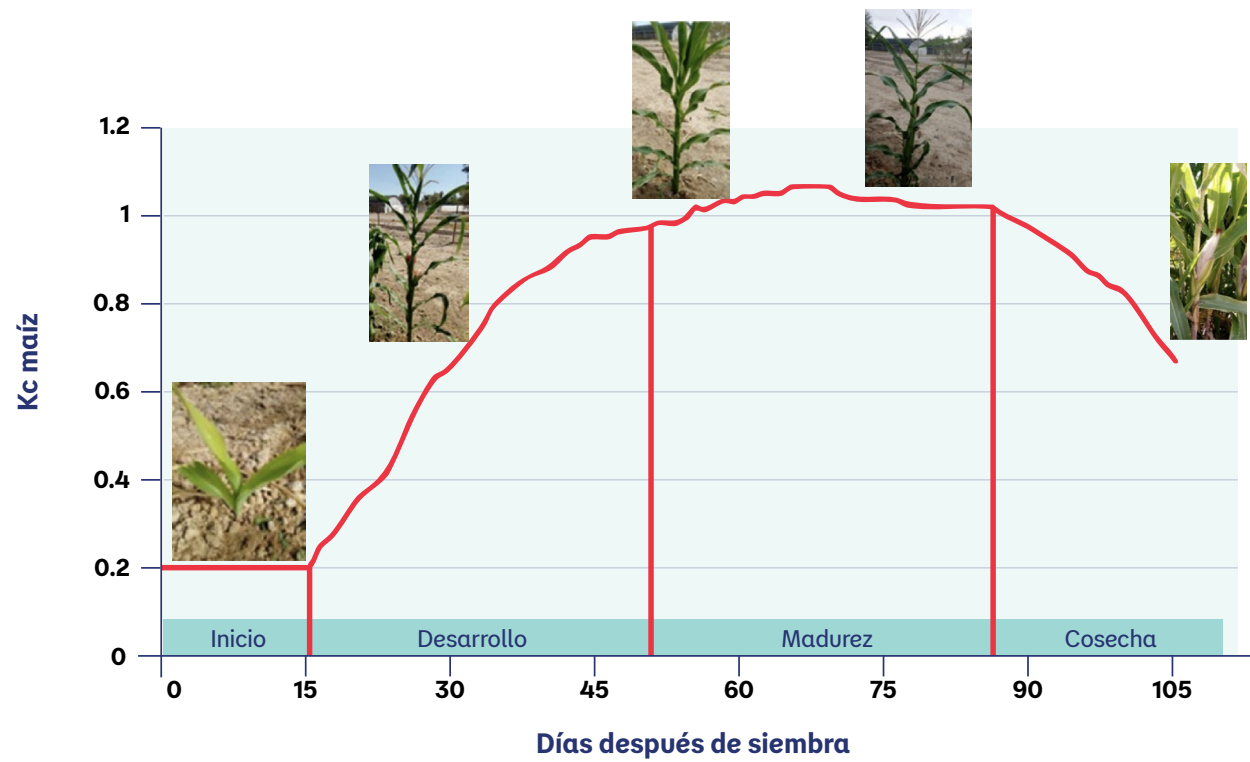
Relacionado con lo anterior, el cambio climático es uno de los retos más grandes, ya que influye en la demanda hídrica de los cultivos (Harina *et al.*, 2021). Con los efectos del cambio climático se espera que la precipitación disminuya en 10% y la temperatura aumente entre 3 °C y 4 °C en las regiones semidesérticas de México. En áreas donde la temperatura se incremente (clima árido), las necesidades hídricas de los cultivos aumentarán (Amini *et al.*, 2023). Por este motivo, es de suma importancia el uso eficiente del agua en los cultivos.

En los últimos años, en la Región Lagunera, en adición al empleo de la información derivada de las estaciones meteorológicas automatizadas, Reyes *et al.* (2023) han utilizado la evapotranspiración de referencia (ET_o) derivada del atmómetro (equipo para estimar la tasa de ET_o) (figura 5) y el coeficiente de cultivo (K_c) (figura 6) para programar el riego en maíz forrajero con riego por goteo, obteniendo como resultado producciones de materia seca hasta de 24 t ha⁻¹ y contenido de almidón de 28%. Al programar los riegos de manera eficiente con base en la ET_o y el K_c del cultivo, los rendimientos se incrementan en 20%, el ahorro de agua en 15% y la calidad del forraje en 10%

Figura 5. Atmómetro, equipo para detectar la evapotranspiración de referencia



Figura 6. Curva de coeficiente de cultivo (kc) para maíz forrajero, generada por Reyes et al. (2019)

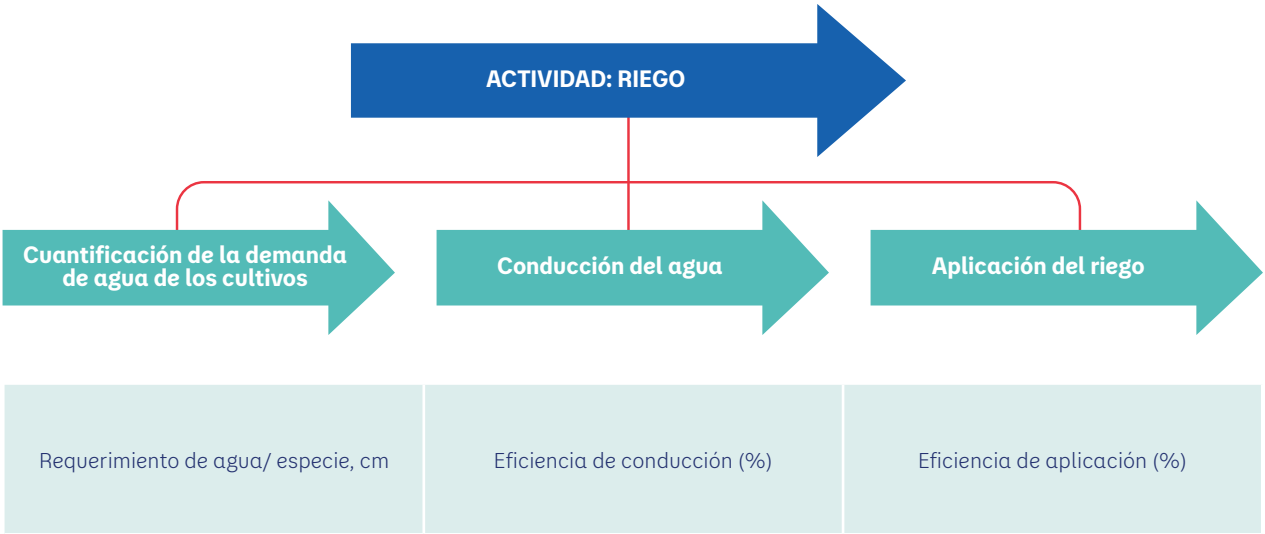


Efecto de los sistemas de riego en el uso del agua de los cultivos forrajeros

Para la producción de forrajes, una vez determinadas las necesidades hídricas de los cultivos, tomando en cuenta el clima, suelo y tipo de cultivo, el siguiente paso es definir y evaluar el sistema de riego. Para la selección del sistema (figura 7) se deben considerar

aspectos como fuente, calidad y disponibilidad de agua, requerimientos del cultivo, costo de establecimiento y operación del sistema de riego, así como la eficiencia con la que operan los diferentes sistemas (Núñez-Hernández, 2009).

Figura 7. La actividad de riego y sus indicadores



En el distrito de riego 017 en la Región Lagunera, en la mayoría de casos en el sector ejidal se utilizan sistemas de riego por gravedad, varios de ellos con una eficiencia de riego menor de 50% (Ramos-Cruz *et al.*, 2019; Catalán *et al.* 2012). En contraste, en muchos sistemas tecnificados se puede alcanzar hasta un 80%, considerando soporte técnico en cada uno de los componentes que determinan la eficiencia

total del riego. Por lo anterior, una estrategia ha sido generar soporte técnico y conocimiento para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego, y productividad del agua de las especies forrajeras usadas en la región (Núñez *et al.*, 2012). Con relación a esto, se indican las diferentes eficiencias de riego (cuadro 4) con las que trabajan los sistemas en la aplicación del agua para los cultivos (Barta *et al.*, 2004).

Cuadro 4. Eficiencias globales de los sistemas de riego

Tipo de riego	Eficiencia Global %
Rodado sin tecnificar	50-60
Rodado tecnificado	60-80
Pivote central	60-90
Cintilla	70-95

En los sistemas intensivos de producción de leche, los sistemas de riego superficiales o rodado (riego en melgas o surcos) son los más comunes, seguidos de la aspersión, que es la aplicación de agua en forma de lluvia, y el goteo aplicado por cintilla.

La eficiencia global de los sistemas de riego considera la eficiencia del requerimiento de riego del cultivo, que es la cantidad de agua que requiere el cultivo tomando en consideración las etapas de desarrollo y condiciones climáticas.

La eficiencia de conducción se relaciona con la cantidad de agua al inicio y final de la conducción. En las acequias de tierra, se tiene una mayor pérdida de agua causada por infiltración, fugas y malezas como barreras de escurrimiento que en la conducción de agua por tubería en un sistema de riego superficial o por aspersión o goteo, donde las pérdidas de agua son mínimas y ocasionadas únicamente por fugas (Anaya-Salgado *et al.*, 2014; Catalán-Valencia *et al.*, 2012).

En la Región Lagunera, en el caso de riego superficial se utiliza información de los gastos de operación o cantidad

de agua con la que cuenta el sistema, textura del suelo, anchos de melgas o surcos, largos, pendientes de terreno o inclinación del terreno y pruebas de avance del riego. Con la información recabada en campo se ejecuta el modelo SIRMOD II, generado en la Universidad de Utah, en Estados Unidos (Walker, 1999), u otro programa similar para el diseño y evaluación del riego superficial.

Eficiencia del sistema de riego superficial tipo válvulas alfalferas

En los sistemas de riego superficial se utilizan las denominadas válvulas alfalferas para aplicar el agua de riego a nivel parcela. Delgado Ramírez *et al.* (2013) mencionan que la eficiencia potencial con esta tecnología puede ser hasta de 80%, pero la evaluación en campo realizada en 1,792 hectáreas evaluadas osciló solo entre 41% y 78% (cuadro 5). Como se puede observar, con el uso de válvulas alfalferas se tiene una buena eficiencia de conducción debido al uso de tubería, pero se pueden tener grandes variaciones en la eficiencia para cubrir los requerimientos del cultivo, eficiencia de aplicación, y en la uniformidad de distribución.

Cuadro 5. Valores mínimos, máximos y promedio de las eficiencias globales de riego con tipo válvulas alfalferas en la Región Lagunera

Tipo de Eficiencia	Eficiencia de Conducción, %	Eficiencia de Aplicación, %	Eficiencia de Requerimiento, %	Uniformidad de Distribución, %	Eficiencia Global, %
Mínima	83	52.3	61	60	41
Máxima	98	100	100	97.4	78
Promedio	93.1	90	83.3	89.6	61.2

El patrón de cultivos también afecta la eficiencia en el uso del agua

Eficiencia global de diferentes sistemas de riego, en un grupo representativo de unidades de producción de leche en la Región Lagunera

La eficiencia de riego consideró los tres componentes: eficiencia de requerimiento de necesidades hídricas, conducción y aplicación (Jasso *et al.*, 2007). En el cuadro 6 se muestran los resultados de los promedios de 19 sistemas de riego evaluados, de los cuales 14 correspondieron a riego rodado, tres a goteo subsuperficial y dos a pivote central (Anaya-Salgado *et al.*, 2014).

Cuadro 6. Parámetros de comportamiento de las eficiencias de los sistemas de riego en explotaciones lecheras en la Región Lagunera

Eficiencia	2011	2012	2013	Media
Requerimiento, %	74.14±16.04	69.56±20.35	76.46±19.04	73.39
Conducción, %	94.17±5.58	96.00±3.77	95.70±4.39	95.29
Aplicación, %	75.98±11.52	75.49±21.52	82.50±16.85	77.99

Como se puede observar, aun es necesario mejorar la eficiencia global a nivel de la eficiencia del requerimiento del cultivo y de aplicación del riego.

Evaluación de tres sistemas de riego: goteo subsuperficial, pivote central y gravedad en maíz forrajero

En un estudio en un rancho en la Región Lagunera se evaluaron tres tipos de riego en el cultivo de maíz forrajero. Con un enfoque en la productividad del agua utilizada a nivel comercial se reportaron eficiencias en el uso del agua (EUA) de 1.7, 2.4 y 4.1 kg de materia seca m⁻³ para el riego por gravedad, aspersión por pivote central y riego por goteo con cintilla, respectivamente (Montemayor *et al.*, 2012). Estos autores concluyen que la eficiencia de riego global fue mayor en el riego por goteo con respecto al riego por aspersión y gravedad (cuadro 7). Actualmente se sigue incrementando el uso del riego por cintilla tanto en la Región Lagunera como en Aguascalientes. Sin embargo, las principales limitantes son el alto costo de inversión y la mayor necesidad de soporte técnico

Cuadro 7. Volumen y eficiencias en el uso del agua de riego en maíz con tres sistemas de riego en la Región Lagunera

Tipo de riego	Volumen (m³)	Lr (cm)	FS t ha ¹	EUA kg m ³
Gravedad	6200	62	10.83	1.7
Pivote	5200	52	12.25	2.4
Goteo	4500	45	18.35	4.1

Lr = Lámina de riego; FS = Forraje seco; EUA= Eficiencia en el uso del agua en kg de forraje seco por metro cúbico de agua.

Uso eficiente del agua con los sistemas de riego por goteo y gravedad en el cultivo de alfalfa

De la misma manera, los sistemas de riego tienen un efecto directo en la productividad del agua en el cultivo de alfalfa. En un estudio realizado en la Laguna, Montemayor et al. (2010) reportaron eficiencias en el uso del agua de 1.13 kg m⁻³ para el riego por gravedad y 2.14 kg m⁻³ para el riego por goteo con cintilla (cuadro 8). Valores similares a los obtenidos por Godoy-Avila et al. (2003), quienes reportaron una eficiencia de riego de 1.03 kg m⁻³ para el riego por gravedad y 2.17 kg m⁻³ para el sistema de riego con cintilla (cuadro 9).

Cuadro 8. Eficiencias en el uso del agua de riego en alfalfa con riego por gravedad y cintilla en la Región Lagunera

Tipo de riego	EUA kg m ⁻³
Gravedad	1.13
Cintilla	2.14
EUA= Eficiencia en el uso del agua en kg de forraje seco por metro cúbico de agua.	

Cuadro 9. Volumen y eficiencias en el uso del agua de riego en alfalfa con riego por gravedad y cintilla en la Región Lagunera

Tipo de riego	Volumen	FS kg ha ⁻¹	EUA kg m ⁻³
Gravedad	12500	12920	1.03
Cintilla	7473	16240	2.17
FS= Forraje seco; EUA= Eficiencia en el uso del agua en kg de forraje seco por metro cúbico de agua.			

Eficiencia de aplicación global del riego

En el cuadro 10 se muestra la eficiencia global del riego y sus componentes en tres diferentes sistemas de riego en la Región Lagunera, donde se puede confirmar que el sistema de riego por goteo con cintilla es el que mayor eficiencia global presenta.

Cuadro 10. Eficiencia de aplicación global del riego con tres diferentes sistemas de riego en la Región Lagunera

Eficiencia (%)	Sistema de riego		
	Superficial	Aspersión	Cintilla
Conducción	70	90	95
Distribución	57	81	96
Requerimiento	55	83	94
Global	61	85	95

Eficiencia del uso del agua por cultivo o especie

La alimentación del ganado en los sistemas intensivos de producción de leche en las zonas áridas y semiáridas de México como la Región Lagunera y templada como Aguascalientes, se basa principalmente en el empleo de especies forrajeras que tengan un buen valor nutricional para la producción de leche. En el cuadro 11 se presenta, como otra estrategia, la eficiencia en el uso de agua de forrajes por ciclo de producción en la Región Lagunera y Aguascalientes.

Cuadro 11. Eficiencia en el uso del agua de forrajes por ciclo de producción en la Región Lagunera y Aguascalientes
 S= riego superficial; C= riego con cintilla; t= temporal, p= pivote.

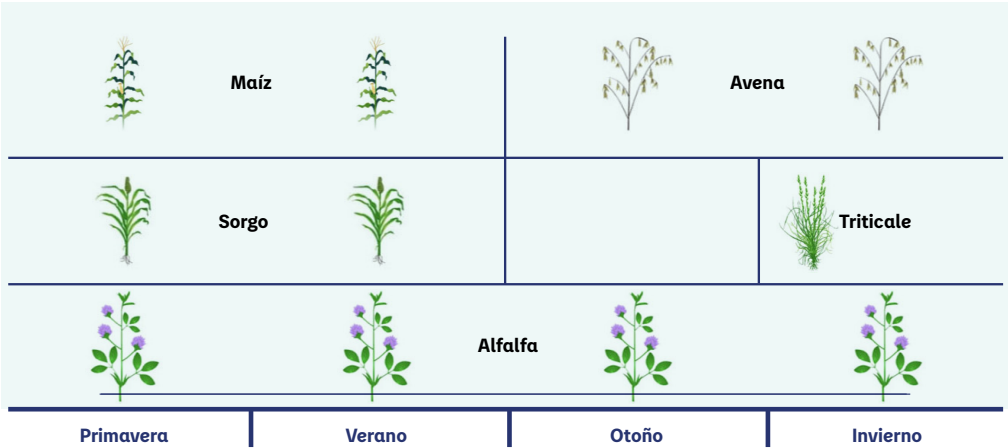
Concepto	EUA (kg MS m ³⁻¹)		Fuente bibliográfica	
	Comarca Lagunera	Aguascalientes	Comarca Lagunera	Aguascalientes
Primavera y/o verano				
Maíz	1.39 ^{sc}	3.62 ^t	Gutiérrez-Guzmán <i>et al.</i> , 2022	Osuna-Ceja y Martínez-Gamiño, 2017
	3.24 ^c	4.10 ^c	Ortiz-Díaz <i>et al.</i> , 2022	Núñez <i>et al.</i> , 2012
	3.43 ^c		Zavala-Borrego <i>et al.</i> , 2022	
	2.84 ^c		Yescas <i>et al.</i> , 2015	
	3.5 ^c		Ortiz-Díaz <i>et al.</i> , 2022	
Sorgo	2.65 ^s	4.01 ^t	Olguín, 2013	Osuna-Ceja y Martínez-Gamiño, 2017
	5.25 ^{sc}		Zavala-Borrego <i>et al.</i> , 2021	
Soya (alternativo)	1.17 ^s		Olguín, 2013	
Otoño-invierno				
Avena	1.25 ^{sc}	1.18 ^s	Ochoa <i>et al.</i> , 2011	García <i>et al.</i> , 2016
	1.18 ^{sc}	3.00 ^c	Sánchez <i>et al.</i> , 2011	Núñez <i>et al.</i> , 2012
	1.35 ^s		Cruz <i>et al.</i> , 2012	
Triticale	1.79 ^{sc}		Ochoa <i>et al.</i> , 2011	
	1.64 ^{sc}		Sánchez <i>et al.</i> , 2011	
	1.65 ^p		Montemayor <i>et al.</i> , 2015	
	1.50 ^s		Cruz <i>et al.</i> , 2012	
Canola (alternativo)	1.91 ^s		Cruz <i>et al.</i> , 2012	
	3.0 ^c		Ortiz-Díaz <i>et al.</i> , 2025	
Cártamo (alternativo)	3.2 ^c		Ortiz-Díaz <i>et al.</i> , 2025	
Perennes				
Alfalfa	1.75 ^c	1.47 ^c	Montemayor <i>et al.</i> , 2012	Núñez <i>et al.</i> , 2012
	2.05 ^c		Montemayor <i>et al.</i> , 2010	
	1.0 ^s		Reta <i>et al.</i> , 2010	
	1.18 ^s		Quiroga y Faz, 2005	
EUA= Eficiencia en el uso del agua en kg de forraje seco por metro cúbico de agua. MS= Materia seca				

Eficiencia del uso del agua por patrón de cultivos

En los sistemas intensivos de producción de leche, la combinación del tipo de opciones forrajeras se denomina patrón de cultivos, y éstos también afectan la eficiencia en el uso del agua. El patrón tradicional de cultivos de la Región Lagunera se muestra en la figura 8. Este patrón tradicional de cultivos se basa en maíz y sorgo, ambos forrajeros, en el ciclo de primavera-verano, los cuales constituyen fuentes de energía y fibra digestible de las raciones para las diferentes clases de ganado. En cuanto a las fuentes

de proteína, se siembra la alfalfa como cultivo perenne. En el ciclo de otoño-invierno, los cereales de grano pequeño como la avena y triticale son otras opciones de forraje. Si se requiere obtener contenidos de proteína similares a los de la alfalfa, los cereales forrajeros deben cosecharse en etapa de embuche a inicios de floración, aunque se reduzca la producción de forraje seco por hectárea cerca de un 30%. En caso que se requiera más forraje con menos proteína, se puede cosechar en estado lechoso-masoso.

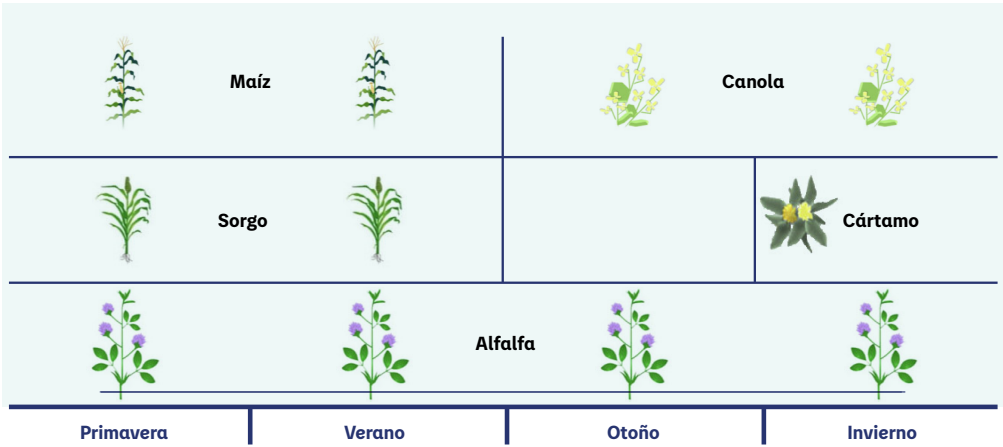
Figura 8. Patrón tradicional de cultivos forrajeros en la Región Lagunera



Por lo anterior, se han investigado dos alternativas forrajeras de invierno que se adapten al patrón de cultivos de la Región Lagunera, la canola tipo primaveral y el cártamo sin espinas (figura 9). Ambas especies pueden mejorar la rotación de cultivos, ya que la canola compensa la pérdida de rendimiento de proteína y producción de la alfalfa, y el cártamo tiene mejor calidad nutricional que la avena con el mismo rendimiento de

materia seca (López-Jara *et al.*, 2025). Un beneficio adicional del cártamo forrajero en la Región Lagunera, es su mayor precocidad, lo cual le permite integrarse en sistemas de producción con doble cosecha en otoño-invierno con ventajas en producción de materia seca y nutrientes, o bien en sistemas de producción tradicionales como alternativa a la avena en siembras tardías (Reta *et al.*, 2016).

Figura 9. Patrón alternativo de cultivos forrajeros en la Región Lagunera







Adicionalmente, las secuencias de cultivo alternativas con doble cosecha en otoño-invierno y la incorporación de especies forrajeras como canola, cártamo y triticale presentan ventajas en potencial forrajero y productividad del agua en comparación con las secuencias de cultivo tradicionales en la región. Al respecto, la especie que tiene menor productividad del agua o eficiencia en el uso del agua, es la alfalfa (1.0-1.15 kg de MS por m³ de agua). El patrón de cultivos tradicional maíz-maíz-avena tiene una EUA de 1.65 a 1.99, y el patrón sorgo-sorgo-avena de 1.86 a

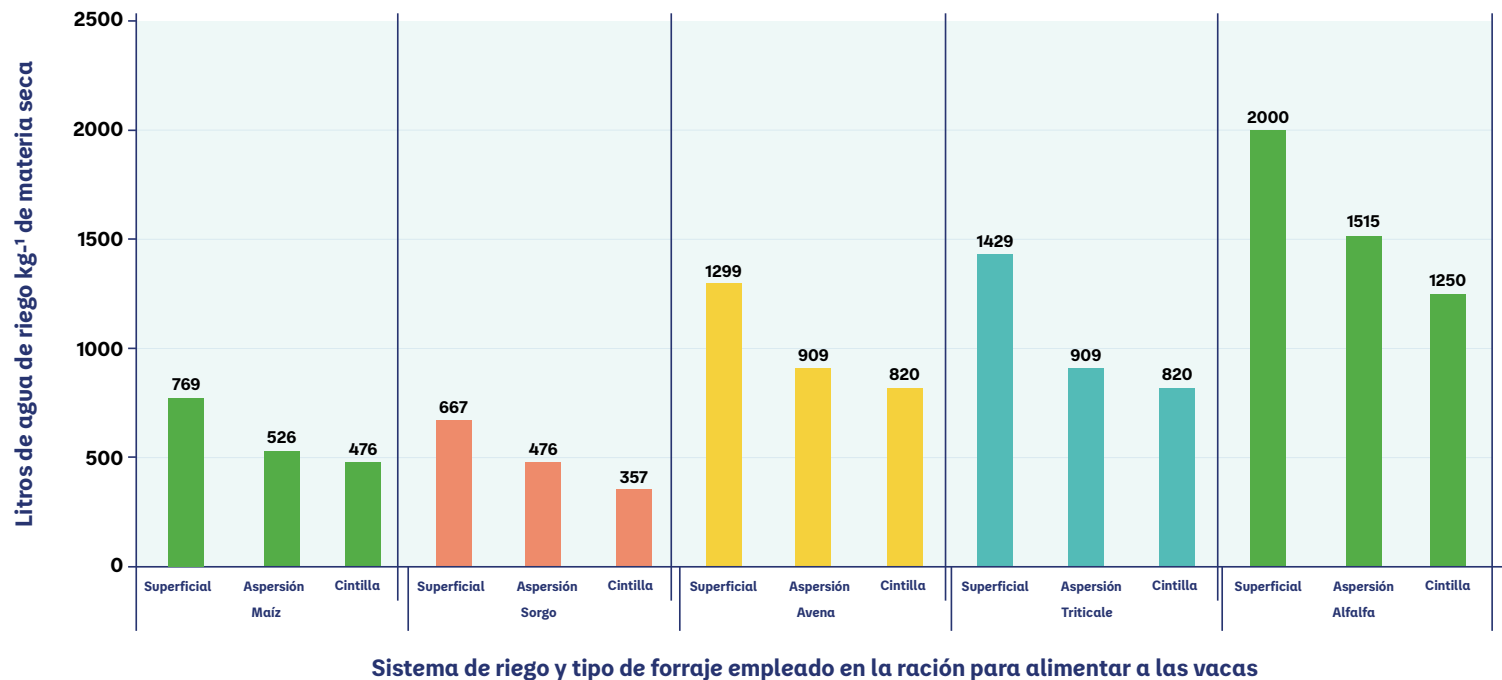
2.06 kg de MS por m³ de agua. En cuanto a los patrones de cultivos que incluyen forrajes alternativos, el patrón maíz-maíz-canola presenta valores de EUA de 1.92 a 2.29, sorgo-sorgo-canola 2.10 a 2.30, maíz-canola-triticale 1.92 a 2.0, y maíz-canola-cártamo 1.89 a 1.90 kg de MS por m³ de agua (Reta *et al.*, 2015; Reta *et al.*, 2017). Es importante señalar que, aunque lo anterior está bien documentado, la adopción de estos patrones alternativos no ha ocurrido hasta ahora. Queda pendiente evaluar el porqué no ha ocurrido la adopción de estos patrones alternativos.

Estimación de la huella hídrica en la producción de leche para un caso en el sistema intensivo en la Región Lagunera

Para la estimación de la huella hídrica de la producción de leche se utilizó información correspondiente a los forrajes y sistemas de riego. En la figura 10 se puede observar el volumen de agua de riego requerido por kilogramo de materia seca para los diferentes forrajes empleados para la alimentación de vacas lecheras en establos intensivos en la Región Lagunera, considerando el uso de diferentes sistemas de riego y sus eficiencias. Con sistemas de riego superficial, por cada kilogramo de alfalfa se requieren 2,000 litros de agua de

riego, mientras que cada kilogramo de forraje de maíz, sorgo o avena sólo requieren 667, 769 y 1,299 litros, respectivamente. Aunque con los sistemas de riego por aspersión y goteo por cintilla se reducen los volúmenes de agua de riego por kilogramo de materia seca, esta información muestra el gran impacto de las estrategias de selección de especies forrajeras y la eficiencia de los sistemas de riego en la huella hídrica por cada kilogramo de materia seca de forraje utilizado en la alimentación del ganado.

Figura 10. Volumen de agua de riego requerido por kilogramo de materia seca de diferentes forrajes, empleados para alimentar a las vacas en establos del sistema intensivo en la Región Lagunera



En La Laguna con sistemas de riego superficial, por cada kilogramo de alfalfa se requieren 2,000 litros de agua de riego, mientras que cada kilogramo de forraje de maíz, sorgo o avena solo requieren 667, 769 y 1,299 litros, respectivamente

La estructura del hato es un aspecto importante a considerar en un establo, ya que además de las vacas en producción se tienen vacas secas, vaquillas y becerras para tener una producción sostenida de leche. Aquí se considera el proceso de manejo de la alimentación, el proceso de manejo reproductivo, crianza de becerras y vaquillas de reemplazos, y el proceso de salud (Wattiaux y McCullough, 1994).

En el cuadro 12 se muestra la estructura del hato en sistemas de producción en la Región Lagunera y Aguascalientes. Al respecto, estos resultados son similares a un estudio realizado en Estados Unidos (Oleggini et al., 2001), en el que analizaron 11,719 establos y encontraron que el porcentaje de vacas en leche fue de 87.2%, 86.3% y 85.8% en explotaciones lecheras en el norte, centro-sur y sur de los Estados Unidos de América.

Cuadro 12. Indicadores del sistema de producción de leche de bovino intensivo en la Región Lagunera y Aguascalientes

Concepto		Indicador	Región Lagunera	Aguascalientes
Indicadores generales del sistema	Estructura del hato	No. total de cabezas	3,893±2,006	1,124±1,186
		Vacas productoras (%)	45.8±6.8	52.4±5.2
		Vacas secas (%)	9.8±4.5	6.8±1.6
		Vaquillas > 1 año (%)	22.8±6.8	17.94±4.7
		Becerras < 1 año (%)	26.5±7.7	23.1±6.9
		Porcentaje de vacas en leche del total de ganado adulto	82%	88%
	Producción de leche	Producción de leche (L vaca ⁻¹ día ⁻¹)	29.0±2.21	31.4±1.38
		Proteína en la leche (%)	3.26±.14	3.43±.13%
		Grasa en la leche (%)	3.16±.11	3.5±.16

Utilización de forrajes en la alimentación del ganado en el hato

En el cuadro 13, se presenta el porcentaje de forraje en las raciones de las diferentes clases de ganado en las explotaciones lecheras en la Región Lagunera y Aguascalientes (Núñez *et al.*, 2012). En ambas regiones, en las raciones de las vacas productoras se utiliza un porcentaje menor de forraje en comparación a las otras clases de ganado, aunque es importante considerar

que los consumos de materia seca son mayores para las vacas productoras y menores para las vacas secas, vaquillas y becerras. Núñez *et al.* (2009) señalan necesidades anuales de forraje (materia seca) de 3,000 kg, 3,600 kg, 4,150 kg y 1,150 kg por vaca en producción, vaca seca, vaquilla de uno a dos años y becerro de un año, respectivamente.

Cuadro 13. Porcentaje de forraje en las raciones de las diferentes clases de ganado en establos lecheros intensivos en la Región Lagunera y Aguascalientes

Indicador	Región Lagunera	Aguascalientes
% de forraje en raciones de vacas	44.1±7.7	45.94±9.3
% de forraje en raciones de vacas secas	92.3±5.6	87.3±9.3
% de forraje en raciones de vaquillas	88.0±5.8	77.3±16.4

En las dos regiones, la alfalfa y el maíz forrajero para ser ensilado son los principales forrajes para la alimentación de vacas productoras. Los cereales de invierno se utilizan en las otras clases de ganado. El forraje de sorgo se utiliza principalmente en la Región Lagunera y el rastrojo de maíz en Aguascalientes para animales de menos producción o en etapa de desarrollo. Para vacas secas se utiliza ensilado de maíz, sorgo, cereales de invierno y en menor grado

alfalfa de segunda. Para las vaquillas se utiliza ensilado de sorgo, de cereales de invierno y en menor grado, ensilado de maíz. En el caso de las becerras, se proporciona alfalfa de segunda y en menor grado sorgo, ensilados de cereales de invierno y maíz (Núñez *et al.*, 2012).

En el cuadro 14 se presenta un ejemplo de las cantidades de forrajes empleados en las diferentes raciones totalmente mezcladas en un establo de la Región Lagunera.

Cuadro 14. Cantidad de forrajes con base en materia seca (kg d⁻¹) en las raciones totalmente mezcladas de diferentes animales en un establo del sistema intensivo en la Región Lagunera

Forrajes en la ración totalmente mezclada	Vacas en producción	Vacas reto	Vacas secas	Vaquillas de 6 a 12 meses	Vaquillas inseminadas	Vaquillas preñadas
Silo de maíz	2.00	-	-	-	-	-
Silo de sorgo	2.06	4.64	4.67	0.44	1.10	2.20
Heno de alfalfa	2.67	0.77	2.55	0.55	1.11	3.74
Heno de avena	-	0.90	0.90	0.99	1.80	2.79

Con la información correspondiente a los forrajes y sistemas de riego, se estimó la huella hídrica azul por concepto de forrajes, para este caso del sistema de producción intensivo en la Región Lagunera, empleando la siguiente fórmula modificada de Gutiérrez-León *et al.* (2025):

Donde:

HH_{AZUL} = (AC*A) / H

HH_{AZUL} = Huella hídrica (L, agua). AC = Forraje consumido con base en materia seca. A = Litros de agua utilizada para producir un kilogramo de materia seca de cada forraje. H = Número de animales en el establo (tipo = vacas en producción, secas o vaquillas).

Las secuencias de cultivo alternativas con doble cosecha en otoño-invierno y la incorporación de especies forrajeras, como canola, cártamo y triticale, presentan ventajas en potencial forrajero y productividad del agua en comparación con las secuencias de cultivo tradicionales en la región de La Laguna

En este caso, no se consideró el consumo voluntario de agua del ganado, así como el agua empleada para la limpieza de la sala de ordeño, por representar una parte muy pequeña de la huella hídrica, ya que se ha reportado que el consumo voluntario de agua de los animales, el agua de servicio y el agua para mezclar el alimento

representan el 1.1%, el 0.8% y el 0.03%, respectivamente, de ésta (Hoekstra, 2012). Por dicha razón, no fue considerado para el presente ejemplo. En el cuadro 15 se muestra la estimación de la huella hídrica azul para las diferentes clases de ganado en un establo del sistema intensivo de la Región Lagunera.

Cuadro 15. Estimación de la Huella hídrica azul (L de agua por animal por día), por concepto de forrajes, estimada para los diferentes tipos de animales en un establo intensivo de la Región Lagunera, considerando las cantidades de cada forraje en la ración totalmente mezclada

Forrajes en la ración totalmente mezclada	Vaca en producción	Vaca reto	Vaca secas	Vaquilla de 6 a 12 meses	Vaquilla inseminada	Vaquillas preñada
Silo de maíz, L	694	-	-	-	-	-
Silo de sorgo, L	392	884	890	84	210	419
Heno de alfalfa, L	1,780	513	1,700	367	740	2,493
Heno de avena, L	-	495	495	544	989	1,533
Huella Hídrica _{azul} , L	2,866	1,892	3,085	995	1,939	4,445

En este ejemplo, se muestra que las vacas en producción tienen una Huella Hídrica azul de 2,866 litros de agua por día por concepto de forrajes. Otras clases de ganado como las vacas secas y las vaquillas preñadas requieren mayores volúmenes de agua, debido a que sus raciones contienen altos porcentajes de forraje en comparación con los animales en producción.

Con base en lo anterior, se estimó una huella hídrica de 81.88 litros de agua por litro de leche producida, considerando sólo los forrajes en la ración, para una vaca que produce 35 litros de leche por día en el sistema intensivo de la Región Lagunera. A medida que se aumenta el porcentaje de forraje a 40% y 50%, la huella hídrica aumenta a 113 y 132 L de agua para producir un litro de leche. En este caso, no se incluye el volumen de agua de riego requerido por los granos u otros ingredientes, ya que no se producen en la Región.

Referencias

- Amini, N. M., Fatahi, N. R., Salami, H., Raeisi, V. H., & Ostad, A. A. (2022). Effect of different managements with drip irrigation (tape). *Applied Water Science*, 13(37), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01847-52>.
- Anaya-Salgado, A., Núñez-Hernández, G., Cruz-Chaires J. J., Faz-Contreras, R., Rodríguez-Hernández, K., Figueroa-Viramontes, U. & Serrato-Medina, H. A. (2014). Producción, manejo y eficiencia en el uso del agua en explotaciones lecheras de La Región Lagunera en el periodo 2012-2013. *Agrofaz*, 14, 123-126. Disponible en: http://faz.ujed.mx/agrofaz/AGROFAZ_VOL14_NUM1.pdf
- Bannayan, M., Hoogenoom, G., & Crout, N. M. J. (2004). Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. *Ecological Modeling*, 180(2), 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.022>
- Barta, R., Broner, I., Schneekloth, J. & Wasko, R. (2004). Colorado high plains irrigation practices guide. Special Report No. 14. Colorado Water Resources Research Institute. Colorado State University. P 6.
- Belflower, J. B., Kiepper, Perry, J. C., Risse, L. M. & Smith, R. C. (2012). Water and Electricity Consumption on Pasture-based and Confined Dairies in Georgia. *Applied Engineering in Agriculture*, 28, 259-263. <https://doi.org/10.13031/2013.41344>
- Catalán-Valencia E.A., Villa-Castorena M.M., Inzunza-Ibarra M.A., Román López A., González-Barrios J.L. (2012). Cálculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. *Agrofaz*, 2(3), 123-131.
- Chaves, B. N. F. & Gutiérrez, S. M. V. (2017). Respuesta al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253.
- Cruz, Ch. J. J., Faz, C. R., Núñez, H.G., Sánchez, D.J. I., Reta, S. D. G. & Reyes, G. A. (2012). Producción de materia seca, lámina de riego aplicada y eficiencia en el uso del agua de riego de cultivos forrajeros de invierno. En: XLVIII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria. Querétaro, Qro. p. 320.
- Delgado-Ramírez, G., Estrada-Ávalos, J., Trucíos-Caciano, R., Rivera G. M. & Catalán V. E. A. (2013). Metodología para la evaluación de la eficiencia global del riego en sistemas tipo válvulas alfalferas: caso región lagunera. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 12(1), 3-6.
- García, R. V. H., Flores, G.H., Narváez M. M. P. & Osuna, C. E. S. (2016). Eficiencia en el uso del agua y producción de forraje en avena (*Avena sativa* L.) invernada. En: 28 Semana Internacional de Agronomía. Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Gómez Palacio, Durango. 603-608.
- Gerbens-Leenes, P. W., Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2011). A comparative study on the water footprint of poultry, pork and beef on different countries and production systems. Value of Water Res. Rep. Ser. No. 55. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Godoy-Avila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes, I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 37(2), 107-115.
- Gutiérrez-Guzmán, U. N., Ríos-Vega, M. E., Núñez-Hernández, G., Esquivel-Romo, A., Vázquez-Navarro, J. M. & Anaya-Salgado, A. (2022). Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 28, 263-273.
- Gutiérrez-León, F. A., Briones, Z.S. P. & Lastra-Bravo, X. B. (2025). Estimación de la huella hídrica de la ganadería de leche en la sierra centro norte del Ecuador. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(2), 362-375.
- Harina, A. A., Tukimat, N. N. A., & Malek, M. A. (2021). Analysis of linear scaling method in downscaling precipitation and temperature. *Water Resource Management*, 36, 171-179. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03020-0>
- Hoekstra, A. Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and Dairy. *Animal Frontiers*, 2, 1-8. <http://dx.doi.org/10.2527/af.2012-0038>
- Jasso, I. R., Potisek, T.M. C., Figueroa, V. U., Faz, C. R. & Núñez, H. G. (2007). Requerimientos hídricos de alfalfa con la influencia del fenómeno del niño y deterioro potencial del suelo. 2007. Memorias XIX Semana de Agronomía. Gómez Palacio, Durango.
- López-Jara, A. G., Reta-Sánchez, D. G., Santana, O.I., Reyes-González, A., Rodríguez-Hernández, K., Granados-Niño, J. A., López-Calderón, M. J. & Sánchez-Duarte, J. I. (2025). Forage yield and nutritional value of silage from alternative and traditional autumn-winter forages. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 16, 208-223.
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, Value of Water Research Report Series No. 48, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>
- Montemayor, T. J. A., Aguirre, A.H. W., Ramírez, J. O., López, A. R., Rivera, G.M., Preciado, R.P., Montemayor T. I. del R., Segura, C.M. A., Orozco, V.J. A. & Yescas, C.P. (2010). Uso del agua en alfalfa (*Medicago sativa* L.) con riego por goteo sub-superficial. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 1(2), 145-156.
- Montemayor, T. J. A., Woo, R.J. L., López, J. M., López, A. R., Segura, C.M. A., Yescas, C.P. & Frias, R.E. (2012). Producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivada con riego sub-superficial y diferentes niveles de fosforo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1321-1332.
- Montemayor, T. J. A., Segura, C.M. A., López, J. M. & Woo, R.J. L. (2015). Productividad del agua en el cultivo de triticale (X. Triticosecale Wittmack) en La Comarca Lagunera de Coahuila, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1533-1541.
- Montemayor-Trejo, J.A., Lara-Mireles, J.L., Woo-Reza, J.L., Munguía-López, J., Rivera-González, M. & Trucíos-Caciano, R. (2012). Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, México. *Agrociencia*, 46(3), 267-278. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000300006&lng=es&tlng=es
- Naranjo, A., Johnson, H., Rossow, A. & Kebreab, E. (2020). Greenhouse gas, water, and land footprint per unit of production of the California dairy industry over 50 years. *Journal of Dairy Science*, 103, 3763- 3773. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16576>
- Núñez, H. G., Cruz, Ch. J. J., Iván, S.O., Rodríguez, H.K. & Sánchez, D.J.I. (2012). Modelo de procesos para el diagnóstico del uso del agua de riego en la producción de forrajes en explotaciones lecheras del sistema intensivo en

ambientes cálido y templado. *Agrofaz*, 12(4), 103-111.

Núñez-Hernández G., Figueroa, V.U., Chew, M.Y.I., Ramírez, D.M., Reyes, J.I., Reta, S.D.G., Faz, C.R., Osuna, C.E.S. & Castro, M.E. (2009). Producción de leche de bovino en el sistema intensivo. Producción y aprovechamiento de forrajes. Libro técnico núm. 23 ISBN 978-607-425-268-2. Cap 2. P18-80.

Ochoa, M. E., Núñez, H.G, Sánchez, D.J.I., Reyes, G.A., Rodríguez, H.K., Faz, C.R., Figueroa, V.U., Gómez, R.M. & Morales, F.Z. (2011). Producción, contenido proteico y eficiencia en el uso del agua y nitrógeno de avena y triticale en estado lechoso-masoso bajo diferentes sistemas de riego y fuentes nitrogenadas. *Agrofaz*, 1(3), 89-94.

Oleggini, G. H., L. O. Ely & J. W. Smith. (2001) Effect of region and herd size on Dairy herd performance parameters. *Journal of Dairy Science*. 84:1044-1050.

Olguín, V. S. (2013). Producción, calidad nutricional y eficiencia en el uso del agua de cultivos forrajeros en la Comarca Lagunera. Tesis de maestría. Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. p. 80.

Ortiz-Díaz, S., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Ramírez-Gottfried, R. I., Márquez-Guerrero, S. Y., Rocha-Santillano, J. J. & Reyes-González, A. (2025). Rendimiento y productividad del agua en cultivos de invierno bajo riego deficitario. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1-35. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-16-6-7>

Osuna-Ceja, E. S. & Martínez-Gamiño, M. A. (2017). Rendimiento y calidad de forraje de maíz y sorgo de temporal a cuatro y seis hileras en Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1259-1272.

Quiroga, H. M. G. & R. Faz C. 2005. Incremento de la eficiencia del uso del agua por la alfalfa mediante la suspensión del riego en el verano. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 111-117.

Ramos-Cruz, C. M., Estrada-Ávalos, J., Delgado-Ramírez, G., Pérez-Evangelista, E. R. & Domínguez-Alemán, D. (2019). Evaluación de variables involucradas en riego superficial para incrementar la eficiencia del uso del agua en la Región Lagunera, Coahuila de Zaragoza, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 5(1).

Reta, S. D. G., Figueroa, V.U., Faz, C.R., Núñez, H.G., Gaytán, M.A., Serrato, C.J.S. & Payán, G.J.A. (2010). Sistemas de producción de forrajes para incrementar la productividad del agua. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 83-87.

Reta, S. D. G., Figueroa, V. U., Serrato, C. J. S., Quiroga, G. H. M., Gaytán, M. A. & Cueto, W. J. A. (2015). Potencial forrajero y productividad del agua en patrones de cultivos forrajeros. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 6(2),153-170.

Reta S.D.G., Serrato, C.J.S., Gaytán, M.A., Quiroga, G.H.M., Frausto, L.F., Ordaz, V.S. & Godoy H.J. (2016). Validación de patrones de cultivo forrajeros alternativos con menor estrés por altas temperaturas en la Comarca Lagunera. *Agrofaz*, 16, 65-75.

Reta, S. D. G., Serrato, C.J.S., Quiroga, G.H.M., Gaytán, M.A., & Figueroa, V.U. (2017). Secuencias de cultivo alternativas para incrementar el potencial forrajero y productividad del agua. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(4), 397-406.

Reyes, G. A., Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Ochoa, M. E., Rodríguez, H. K., & Preciado, R. P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 37, 279-290. DOI:10.28940/terra.v37i3.485

Reyes, G. A., Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Preciado, R. P., Rodríguez, M. V. M. & Ruiz, A. O. (2023). Uso del atmómetro y coeficiente de cultivo en la programación del riego en maíz forrajero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3160>

Reyes, G. A., Ruiz, A.O., Sánchez, D. J. I., Reta, S. D. G., Espinoza A. J. J. & Preciado, R. P. (2024). Effect of maximum seasonal temperature on yield and water use efficiency in forage corn in consecutive growing seasons. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-10. e1962 <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1962>

Rotz, A., Stout, R., Leytem, A., Feyereisen, G., Waldrip, H., Thoma, G., Holly, M., Bjorneberg, D., Baker, J., Vadas, P. & Kleinman, P. (2021). Environmental assessment of United States dairy farms. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128153>

Sánchez, D. J. I., Núñez, H. G., Ochoa, M. E., Rodríguez, H. K., Figueroa, V. U., Gómez, R. M. & Morales, F. Z. (2011). Rendimiento, proteína cruda y eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en cereales con diferente tipo de fertilización y sistemas de riego. *Agrofaz*, 11(3), 89-94.

Vanham, D., Leip, A., Galli, A., Kastner, T., Bruckner, M., Uwizeye, A., van Dijk, K., Ercin, E., Dalin, C., Brandao, M., Bastianoni, S., Fang, K., Leach, A., Chapagain, A., Van der Velde, M., Sala, S., Pant, R., Mancini, L., Monforti-Ferrario, F., Carmona-García, G., Marques, A., Weiss, F. & Hoekstra, A.Y., (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of the Total Environment*, 693,133642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>.

Walker, R. W. (1999). Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design User's Guide and Technical Documentation (SIRMOD II). Department of Biological and Irrigation Engineering Utah State University. Logan Utah, E.E.U.U.

Wattiaux, M.A. and D. McCullough. (1994). Dairy Essentials 26) Factors affecting size and productivity of the dairy replacement herd. Babcock Institute for International Dairy Research and Development. Recuperado el 28 de febrero de 2025 de https://kb.wisc.edu/images/group226/52745/de_26.en.pdf

Yescas, C. P., Segura, C.M. A., Martínez, C.L., Álvarez, R.V. P., Montemayor, T.J. A., Orozco, V.J. A. y Frías, R. J. E. (2015). Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 84, 272-279.

Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. de P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Moreno, V. M. & Preciado-Rangel, P. (2021). Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-14. E954.

Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. de P., Cano-Ríos, P. & Rodríguez-Moreno, V.M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420.

PRODUCCIÓN DE LECHE NO ESPECIALIZADA EN EL TRÓPICO: ESTRATEGIAS DE ACCIÓN QUE CONTRIBUYEN A LA MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Rubén Santos Echeverría¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias



A diferencia de los sistemas bovinos lecheros intensivos y familiares de pequeña escala, el sistema bovino de doble propósito (SBDP) utiliza vacas cruzadas de Cebú con razas lecheras europeas, las cuales requieren la presencia del becerro para estimular la bajada de la leche durante el ordeño

Producción de leche en el trópico

La producción de leche en el trópico se realiza predominantemente en el sistema de bovinos doble propósito (SBDP); en México se declaran 97,200 unidades de producción, con 1.78 millones de vacas y 2 millones de hectáreas en este sistema de producción, con una participación marginal en la leche nacional que difícilmente rebasa 7%, pero su producción es de gran importancia económica y social para las comunidades locales (González, 2024).

El SBDP se considera no especializado en producción de leche, pues los recursos disponibles del sistema son utilizados también para la producción de becerros al destete que posteriormente serán engordados, los cuales se desarrollan con una parte de la leche materna que es consumida directamente de sus madres mediante el amamantamiento durante la lactancia, la cual dura siete meses o más. De esta manera, además de producir leche, el SBDP producen becerros para la engorda, entre otros productos económicamente importantes.

A diferencia de los sistemas intensivos y familiar, el SBDP utiliza vacas cruzadas de cebú con razas lecheras europeas, las cuales requieren la presencia del becerro para estimular la eyección o bajada de la leche durante el ordeño, pero también se requiere para sostener la producción de leche durante la lactancia. Además, lejos de ser intensivos, en este sistema, las vacas y sus crías son alimentadas en pastoreo extensivo, incluidos los rastrojos agrícolas, ya sean praderas naturales o introducidas, que se caracterizan por ser de elevado rendimiento en

materia seca, pero con bajo contenido proteínico, altas concentraciones de fibra y baja digestibilidad. La producción forrajera es regulada por la estacionalidad de la lluvia y generalmente se acostumbra suplementar con concentrados cuando el forraje escasea, durante la ordeña o cuando los becerros presentan desnutrición.

Por el genotipo utilizado, la alimentación empleada y otros factores del sistema (bióticos, abióticos y otros de tipo social y comercial), la productividad del SBDP es baja (Román *et al.* 2024), comparado con los sistemas familiar e intensivo, con edades a primera lactación de 40 meses, rendimientos de leche por vaca-hato-día menor a 3 kg y por hectárea-año menor a 200 kg, lo que significa que se tienen extensos periodos improductivos en las hembras.

No obstante, el SBDP no compite con alimentos con los humanos al basar la producción de leche casi sólo con forrajes y rastrojos de cultivos agrícolas que son de uso exclusivo para los rumiantes; con estos mismos, las vacas aportan la materia prima (becerros al destete) para la producción de carne en corral destinada al consumo humano, siendo este sistema un importante proveedor de alimentos de alta calidad para la sociedad. Por tanto, el costo ambiental del aprovechamiento de los forrajes C4 en la producción de leche y becerros al destete en el trópico es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) derivado de su fermentación y digestión ruminal: metano (CH₄), además del óxido nitroso (N₂O) derivado de la gestión de las excretas líquidas (mezcla de excremento, orina y humedad).

Estrategias de acción que contribuyen a la mitigación de GEI

A diferencia de las grandes agroindustrias de producción de leche intensiva y familiar de México, el SBDP se caracteriza por una producción con bajos insumos externos (granos, oleaginosas, compuestos químicos) y porque suministra leche a las pequeñas agroindustrias de la comunidad o la vende directa al consumidor local (González *et al.*, 2024), lo que reduce su aportación marginal de GEI derivadas de su cadena de proveeduría y del transporte-transformación para el consumo de sus productos (leche, becerros al destete y animales de desecho).

Sin embargo, las emisiones de GEI del SBDP cobran mayor importancia en los procesos internos de este último relacionadas con el inventario ganadero, de baja producción de leche y carne por unidad animal y por hectárea, y con extensos periodos de improductividad; la alimentación de los rumiantes a base de forrajes C4 de baja calidad nutricional son la principal fuente de GEI (metano) en el sistema. Además, las quemas agropecuarias en preparación del establecimiento de cultivos agrícolas o forrajeros, así como la apertura de selvas para las siembras agropecuarias (deforestación), exacerban el problema del cambio climático por la emisión de carbono almacenado y una disminución en la capacidad de captura de dióxido de carbono (CO₂), respectivamente. Aunque considerable, la gestión de las excretas en el SBDP bajo pastoreo extensivo como fuente de metano y óxido nitroso, no representa un problema sustantivo.

Empero, el SBDP tiene una amplia capacidad para reducir la emisión de GEI y de aumentar la captación y reservas de carbono con acciones que incluso no hayan sido originalmente diseñadas para ese propósito, como son los pastos mejorados con mayor rendimiento y de mejor calidad nutricional, las dietas con mayor digestibilidad, la incorporación de arbustivas y árboles maderables en

los pastizales y el mejoramiento genético con razas más productivas y adaptadas al trópico (Thornton y Herrero, 2010), así como otras acciones que ayudan a incrementar la productividad animal y de la unidad de producción. Para ello, se deben evitar la deforestación y las quemas agropecuarias, con lo cual se mejorará la captura de carbono y se evitará la liberación del carbono almacenado en la biomasa vegetal, respectivamente.

De esta manera, **las estrategias de acción que contribuyen a la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en el SBDP** son (FAO, 2018):

1. Mejoras de la productividad que reduce las intensidades de emisiones
2. Captura de carbono a través de un manejo mejorado de los pastos
3. Una mejor integración ganadera en la bioeconomía circular

A continuación, se describen cada una de ellas.

1. Mejoras de la productividad que reduce las intensidades de emisiones de GEI

La implementación de tecnologías ganaderas resulta en una mejora de la productividad del SBDP, con un aumento tanto de la producción de leche como de la de carne (Román *et al.*, 2021). Con esto es posible utilizar menor superficie para producir los mismos alimentos para consumo humano, y en gran medida con menos animales para una disminución de la intensidad de emisión de GEI por unidad de producción pecuaria (Thornton y Herrero, 2010; FAO, 2018). Para el SBDP se han generado e implementado tecnologías que favorecen su productividad, como son:

a) Mejoramiento genético. En el SBDP se recomienda utilizar el esquema de cruzamientos recomendado por el INIFAP (Koppel *et al.*, 2002); es decir, llevar y manejar

La alimentación de los rumiantes a base de forrajes de baja calidad nutricional en el SBDP es la principal fuente de metano en el sistema

La apertura de selvas (deforestación) y las quemas agropecuarias para el establecimiento de cultivos agrícolas o forrajeros exacerban el problema del cambio climático

el hato para que su composición genética se encuentre entre 3/4 y 5/8 europeo (hostein, suizo pardo o simmental) por cebú, ya que, de acuerdo con los diversos resultados obtenidos, estos genotipos son los más productivos bajo las condiciones del trópico, con producciones de leche por lactancia superiores a 2,900 kg (Lagunes y Calderón, 2024).

b) Restricción del amamantamiento y suplementación energética.

Si bien el becerro en el SBDP es necesario para la bajada de la leche durante el ordeño y para sostener la producción de ésta durante la lactancia, su presencia junto a la vaca debe limitarse sólo al momento del ordeño y permitirle el consumo de la leche residual, ya que la presencia del becerro afecta la reanudación de la función ovárica posparto, provocando anestro posparto y consecuentemente la posibilidad de gestaciones. Además, considerando que la base de la alimentación del ganado son los pastos o gramíneas, con distintos grados de calidad nutricional, es necesario ofrecer una suplementación energética y proteínica a las vacas y a las crías para un adecuado desempeño reproductivo y productivo. La suplementación energética-proteínica favorece la digestión de los forrajes con menos pérdidas de energía por la vía del metano (Bonilla y Clemente, 2012); además, la restricción del amamantamiento del becerro y la suplementación conjunta favorecen el reinicio de la actividad ovárica de las vacas y por tanto se reducen los días de anestro posparto (Villagómez *et al.*, 2024), con lo que se mejora la productividad de las vacas (más becerros y más lactancias durante la vida productiva de las vacas). En temporada de secas, de baja precipitación pluvial, es necesario ofrecer a los animales un ensilaje de buena calidad que compense la falta de forraje en este periodo de estiaje, mismo que puede elaborarse a base de pastos, maíz, sorgo y/o leguminosas forrajeras.

c) Manejo sanitario. Para evitar pérdidas en la producción animal causadas por las parasitosis y las enfermedades

frecuentes en el trópico, es necesario implementar medidas de manejo sanitario que reduzcan la morbilidad y la mortalidad e incrementen la vida productiva de los animales, siendo así un sistema de producción más eficiente. Se recomienda un manejo integrado para el control de las garrapatas, la desparasitación interna contra parásitos pulmonares y gastrointestinales, así como la vacunación para prevenir el derriengue, la pasteurelosis y el carbón sintomático. Es imperiosa la necesidad de reducir la utilización de productos químicos que sean nocivos para los organismos benéficos del suelo o de las plantas.

Lechería tropical especializada. Consiste en producir leche con razas lecheras puras en el trópico, especializadas en producción de leche (holstein y suizo pardo americano), con un sistema de crianza artificial; es decir, las vacas y las crías se desarrollan de forma independiente como en los sistemas intensivos y familiar. Si bien la producción de metano por kilogramo de leche producida parece ser superior en la lechería tropical especializada versus el SBDP (Calderón-Chagoya *et al.*, 2021), el sistema de lechería tropical especializada presenta mejores índices productivos y reproductivos (Calderón *et al.*, 2016), con la consecuente reducción de días improductivos de las vacas y con ello de las emisiones de GEI por kilogramo de leche producido. Este sistema de producción de leche no ha sido adoptado masivamente en el trópico, pero representa una excelente posibilidad para la producción de leche en México.

2. Captura de carbono a través de un manejo mejorado de los pastos

La utilización de gramíneas de baja calidad nutricional incrementa la producción entérica de metano, por lo que es necesario un adecuado manejo del pastoreo, fertilizar las praderas y, de ser posible, incorporar leguminosas forrajeras para disponer de praderas más productivas, de mejor calidad y mayor diversidad de flora, a fin de que se mejore la producción y la calidad de los pastos. Los

La ganadería regenerativa es un concepto muy amplio cuyas acciones se han focalizado en el mejoramiento de la producción-calidad forrajera, la restauración de la salud del suelo, entre otros

pastos mejorados más conocidos y de calidad nutricional adecuada son los géneros *Urochloa* (chontalpo, humidicola, insurgente, mulato, caimán, cobra y talismán), *Andropogon* (llanero), *Panicum* (Tanzania, tobiata, mombasa, centenario), *Digitaria decumbens* (pangola), *Cynodon nlemfuensis* (estrella de África), entre otros.

Actualmente existen distintos enfoques o conceptos de producción ganadera sustentable y que cada vez cobran mayor importancia por sus efectos en la mitigación del cambio climático a través del aumento de la productividad y digestibilidad de los pastos, la captura de carbono en el forraje y en el suelo, así como de otros servicios ecosistémicos (infiltración de agua, retención de humedad), además del bienestar y la producción animal.

La ganadería regenerativa es un concepto muy amplio, cuyas acciones se han focalizado en el mejoramiento de la producción-calidad forrajera, la restauración de la salud del suelo (incremento de la micro y macrofauna benéfica, materia orgánica), incremento de la biodiversidad de la flora y, con ello, una mayor producción de carne y leche por hectárea (Bravo-Peña *et al.*, 2024). Se utilizan sistemas de pastoreo que favorecen un cambio en el manejo extensivo tradicional de los pastos, tales como el Manejo holístico, pastoreo adaptativo multipropósito, pastoreo rotacional intensivo (PARI), pastoreo regenerativo, pastoreo rotacional Voisin (PRV) y ganadería inteligente, entre otros. Todos estos sistemas consideran una alta densidad en el pastoreo, periodos cortos de éste, largos periodos de descanso de la pradera y el uso de múltiples potreros que serán rotados de manera planificada; esto con el uso de cercos eléctricos alimentados por energía solar. Con estos sistemas de pastoreo se dispone de forrajes vigorosos, más nutritivos y más digestibles, lo cual ayuda en la captura de GEI en el forraje y se disminuye su producción entérica debido a una mejor digestibilidad de los pastos.

Pero, independientemente del sistema de pastoreo utilizado, se debe poner especial atención en el momento

adecuado para el pastoreo, según la especie forrajera, ya que esto determina la productividad y la calidad nutricional. Por ejemplo, con pasto Elefante cosechado mediante pastoreo a una altura de 100 cm versus 135 cm resultó en un incremento de 33% de la carga animal, 15% más leche/vaca, 51% más leche por hectárea y una reducción de 21% en emisiones de GEI por kilogramo de leche producida (Congio *et al.*, 2018). Lo anterior demuestra las ventajas de mejorar la utilización de los pastos para mejorar la productividad animal y las emisiones de GEI. Por tanto, el potencial de mitigación del impacto ambiental puede ser mayor en los sistemas en pastoreo si se toman en cuenta todos los beneficios del mejoramiento de los pastos y los posibles servicios ambientales que estos prestan.

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una modalidad agroforestal que mejora las condiciones medioambientales de la producción ganadera por la combinación de árboles y/o arbustos forrajeros con los pastos o praderas (gramíneas). El sistema contempla la salud del suelo, la productividad forrajera, bienestar animal, usos complementarios (madera, fruta) y servicios ecosistémicos (captura de carbono, biodiversidad, agua y aire limpio, paisaje ganadero, entre otros). Por tanto, es posible enfrentar el cambio climático de forma más efectiva mediante los SSP en el trópico, ya que la reforestación es una de las principales estrategias para enfrentarlo.

Entonces, el principio de los SSP es la incorporación de árboles (maderables o frutales), de especies arbóreas/arbustivas forrajeras (consumo animal de follaje y frutos), cercas vivas y árboles dispersos en las praderas, con diferentes arreglos espaciales y temporales para obtener uno o varios propósitos o beneficios. En el trópico se tiene una riqueza amplia de especies nativas e introducidas, algunas muy conocidas y estudiadas (cuadro 1), que pueden ser utilizadas en los SSP, recomendándose las especies vegetales nativas por su adaptación en el territorio y su aceptación por los productores.

Cuadro 1. Algunas especies vegetales recomendadas o de uso común en los sistemas silvopastoriles en el trópico de México, según el propósito de su utilización

Propósito	Algunas especies vegetales muy usadas y conocidas en el trópico
Maderables	Cedro (<i>Cedrela odorata</i>), caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>), primavera (<i>Tabebuia donnel-smithii</i>), roble (<i>Quercus robur</i>), guayacán (<i>Guaiacum officinale</i>), acacia magnium, parota, guanacaste u orejón (<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.), teca (<i>Tectona grandis</i>), melina (<i>Gmelina arborea</i>).
Frutales	Limón (<i>Citrus limón</i>), mango (<i>Mangifera indica</i>), aguacate (<i>Persea americana</i>), guanábana (<i>Annona muricata</i>), nanche (<i>Byrsonima crassifolia</i>), guayabo (<i>Psidium guajava</i>).
Arbóreas/Arbustivas forrajeras	Guash o guaje (<i>Leucaena leucocephala</i>), Matarratón o cocuite (<i>Gliricidia sepium</i>), Guázimo, guásuma o caulote (<i>Guazuma ulmifolia</i>), cuajilote (<i>Parmentiera aculeata</i>) y botón de oro o falsa árnica (<i>Tithonia diversifolia</i>).
Cercas vivas	Cocuite (<i>Gliricidia sepium</i>), palo mulato o chaca (<i>Bursera simaruba</i>), mote o colorín (<i>Erythrina spp.</i>), sasanil (<i>Cordia truncatifolia</i>), sauce (<i>Salix chinensis</i>), cuajilote (<i>Parmentiera aculeata</i>), Guamuchil (<i>Pithecellobium dulce</i>).
Árboles dispersos	Jícara (<i>Crescentia alata o cujete</i>), chote o cuajilote, (<i>Parlamentiera acuelata</i>), roble (<i>Quercus robur</i>).
Pastos	<i>Urocloa</i> (chontalpo, humidicola, insurgente, mulato, caimán, cobra, talismán), <i>Andropogo</i> (Llanero), <i>Panicum</i> (Tanzania, tobiata, mombasa, centenario), <i>Cynodon nlemfuensis</i> (Estrella de áfrica), <i>Pennicetum</i> (elefante), <i>Digitaria decumbens</i> (pangola).

Para proteger a las especies forestales y leguminosas del consumo animal mientras éstas se desarrollan, es necesario la utilización de cercos eléctricos alimentados de energía solar, los cuales reducen sustancialmente los costos que representan la instalación de cercos fijos; no obstante, se tiene el inconveniente que el sistema de los cercos eléctricos puede ser sustraído por personas ajenas a los predios.

La disponibilidad de árboles dispersos en los potreros, de estrato alto, es necesaria para proporcionar sombra y con ello el bienestar de los animales, además de los beneficios ambientales y económicos que aportan

(enriquecimiento de suelos, medicina tradicional, paisaje, artesanías, frutos comestibles); la densidad de árboles por hectárea recomendada es la que no afecte el crecimiento de las pasturas, regulando la proporción de sombra y sol en el potrero. Por la dificultad en el desarrollo de los árboles cuando se tienen animales en los potreros, una opción viable es dejar crecer especies que no son consumidas por los animales (figura 1), evitando su tala durante el mantenimiento de la pradera; ejemplo de ello son los árboles de jícara (*Crescentia alata o cujete*) y chote (Puxni, en totonaco; *Parlamentiera acuelata*), especies mexicanas muy comunes que se encuentra en zonas tropicales y semihúmedas.

Figura 1. Árbol de chote en desarrollo en potrero de pasto estrella de África



Figura 2. Cerca viva con palo mulato en el Sitio Experimental Las Margaritas, INIFAP



Las cercas vivas son una práctica ancestral que se utiliza para delimitar potreros y contener animales. Los árboles son sembrados de forma lineal cada tres a cinco metros y sostienen de tres a cinco líneas de alambre de púas, que son sujetadas al tallo de los árboles inicialmente por un cordel y posteriormente con grapas de acero. Esta práctica también ofrece sombra y protección a los animales (rompeviento), en la periferia de los predios y los intermedios de los potreros, además de los beneficios ambientales relacionados con la captura de carbono, retención de suelos, escorrentías, alimentos y conectividad forestal para la fauna silvestre. Son muy comunes como cerca viva el cocuite y el palo mulato o chaca (figura 2), entre otras especies.

Una modalidad más sofisticada de los SSP son los denominados SSP intensivo (SSPi), para ramoneo con especies arbóreas/arbustivas forrajeras de alto contenido de proteína (de 15 a 30% con base en materia seca), en una alta densidad por hectárea (ejemplo: más de mil plantas de leucaena por hectárea), combinado con callejones de pastos (veinte metros de ancho), para aumentar la producción de biomasa forrajera por hectárea (Broom *et al.*, 2023), incrementar la carga animal (Broom *et al.*, 2013) y mejorar la nutrición de los animales (Bacab-Pérez *et al.*, 2011; Broom *et al.*, 2013). Con estos sistemas se incrementa la producción de metano por unidad de superficie por el aumento de la carga animal, pero se reduce sustancialmente la producción de GEI por cada kilogramo de leche o de carne producido, reduciéndose la superficie destinada a la producción animal (Broom *et al.*, 2013). Además, con estos sistemas se reduce la emisión de metano por parte de los animales, ya que se aumenta la digestibilidad de la dieta y se aumenta sustancialmente el secuestro de carbono en las áreas de pastoreo (Anguiano *et al.*, 2012).

Es posible con estos sistemas incorporar un estrato de planta superior, con especies forestales o frutales (filas de árboles sembrados cada cinco metros) para producción de madera en el mediano o largo plazo, lo cual aumentará los ingresos económicos de los productores y proporcionará un mejor confort a los animales.

No obstante, estos sistemas son complejos por la diversidad de especies vegetales, densidad de plantas por hectárea y el manejo de los animales, por lo que se dificulta su instalación y manejo por los productores. Además, su inversión inicial es elevada, por lo que los pequeños y medianos productores difícilmente lo pueden adoptar.

Una estrategia sencilla para llevar a cabo la incorporación de arbustivas/arbóreas forrajeras en las unidades de producción ganadera son los bancos de proteína a base de una o más especies de alto valor nutricional, como la proteína (leucaena, botón de oro) que se siembra en lotes compactos de altas densidades para maximizar su productividad (50 mil plantas por hectárea); éstos se usan en pastoreo directo por periodos cortos (una a dos horas por día) o en corte-acarreo. Al igual que con los SSPi, con este sistema se mejora la dieta animal como complemento a la alimentación a base de pastos (Bacab-Pérez *et al.*, 2011) y se acumulan cantidades significativas de carbono en la biomasa y en el suelo (Casanova-Lugo *et al.*, 2017; Anguiano *et al.*, 2012) lo que favorece la mitigación del cambio climático; sin embargo, a pesar de la gran diversidad de estudios y promoción, su empleo en el trópico por los productores es muy limitado.

En resumen, la ganadería regenerativa, los SSP o los sistemas agroforestales en ganadería son cada vez más usados en el trópico; sin embargo, su adopción masiva dependerá de la implementación como política pública de un sistema permanente de asistencia técnica y capacitación auspiciado por instituciones de fomento agropecuario u organismos no gubernamentales para promoverlos, implementarlos y consolidarlos.

3. Una mejor integración ganadera en la bioeconomía circular

La cadena de valor de la producción de leche en el trópico tiene múltiples componentes con el uso de insumos nacionales y locales, pero la leche generalmente se procesa y se utiliza en la misma comunidad, por lo que se puede considerar un sistema de producción de cadena corta de provisión de insumos y oferta de productos. No obstante, el SBDP debe transitar hacia una economía circular, aprovechando los diversos productos locales y propios de la unidad de producción.

En el mejoramiento de la salud de los animales, el suelo y las plantas, se deben evitar o minimizar el uso de compuestos químicos comerciales de alta toxicidad (desparasitantes, insecticidas, herbicidas) y pasar a usar un manejo integrado con el uso de compuestos químicos de bajo impacto ambiental. Los desechos de animales (heces y orina) generalmente son dispersados en los potreros y las pocas excretas que se acumulan en los corrales de manejo o sitios de estancia de los animales se utilizan como base de abonos orgánicos, por lo que esta fuente de GEI no representa un verdadero problema en el SBDP.

En el SBDP los desechos de animales (heces y orina) generalmente son dispersados en los potreros y las pocas excretas que se acumulan en los corrales de manejo o sitios de estancia de los animales se utilizan como base de abonos orgánicos, por lo que esta fuente de GEI no representa un verdadero problema



Se tiene la oportunidad de aprovechar los subproductos agroindustriales de la región en la alimentación del ganado; por ejemplo, cáscaras de cítricos, cascarilla de café, pasta de coco, entre otros. Además, existe una gran diversidad de plantas nativas que producen follaje y frutos (vainas) de alto contenido de proteína y energía, que en determinado momento y en cierta proporción pueden sustituir a los concentrados comerciales de origen externo.

En este apartado se enfatiza la utilización de la ganadería regenerativa y los sistemas agroforestales aplicados a la ganadería, con lo que se busca la regeneración de los sistemas naturales, es decir, sistemas productivos sostenibles y eficientes.

Referencias

Anguiano, J. M., Aguirre, J., Palma, J.M. (2012). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de Cocos nucifera, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(1): 149-160

Bacab-Pérez, H.M., Solorio-Sánchez, F.J. (2011). Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en tepalcatepec, michoacán *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13 (3): 271-278

Bonilla, C.J.A., y Clemente. L.F. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático: Revisión. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 3(2): 215-246.

Bravo-Peña, F., Toro-Letelier, J.J., Alvial, C.N., Hargreaves, M.M., Alfaro, R.C. (2024). Ganadería regenerativa: definición, caracterización y recomendaciones de políticas”, *Documentos de proyectos(LC/TS.2024/134)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Broom, D.M., Galindo, F.A., Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proc R Soc B* 280:20132025. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>

Calderón, E.R.C., Hernández, V.J.O., Olazarán, J.S., Ramírez, G.JdeJ., Rosete, F.J.V., Ríos, U.A., Galaviz, R.J.R., Vega, M.V.E., Castañeda, M.O.G., Aguilar, B.U., Lagunes, L.J. (2016). Manual ilustrado para el manejo de la lechería tropical especializada con bovinos. Libro Técnico Núm. 39 ISBN 978-607-37-0643-8

Calderón-Chagoya C., Hernández-Medrano, J.E., Ruiz-López, F.deJ., García-Ruiz, A., Vega-Murillo, V.E., Mejía-Melchor, E.I., Garnsworthy, P., Román-Ponce, S.I.. (2021). Efecto de la selección genética en contra de las emisiones de metano sobre los componentes de la leche. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 12(1):1-17.

Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñero-Vázquez, A. T., & Díaz-Echeverría, V. (2016). Environmental services from tropical agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269-284. doi: 10.5154/rchscfa.2015.06.029

Conclusión

La producción de leche en el SBDP en México tiene un enorme potencial para lograr un balance en la emisión y mitigación de GEI. Para ello, se requiere que los sistemas sean más productivos y eficientes, y que se transite de una ganadería convencional a una ganadería basada en la agroforestería con prácticas ganaderas agroecológicas y un mejor uso y rendimiento de los pastos, que reduzcan las emisiones de GEI y que favorezcan su captura, garantizando el bienestar de los animales, del ecosistema y de las poblaciones rurales; se deben suspender de tajo las quemadas agropecuarias y la deforestación. Sólo así el SBDP podrá ser sustentable.

Congio, F.S.G., Batalha, D.A.C., Chiavegato, B.M., Berndt, A., Oliveira, P.A.P, Frighetto, T.S.R., Maxwell, M.R.T., Gregorini, P., Da Silva, C.S. (2018). Strategic grazing management towards sustainable intensification at tropical pasture-based dairy systems. *Science of the Total Environment*. 636:872-880.

FAO. (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/8098es>

González, P.E. (2024). Importancia y estructura de la ganadería bovina de doble propósito en México. XXIII Simposio de Ganadería Tropical: Sistema Bovinos Doble Propósito. *Publicación Especial Núm. 13; Veracruz Méx.* Pg. 7 a 17.

Lagunes, L.J. y Calderón, R.R.C. (2024). Tecnología integral para las unidades de producción de doble propósito en el trópico. *Publicación Especial Núm. 13; Veracruz Méx.* Pg. 65 a 74.

Koppel, R.E.T., Ortiz, O, G.A., Ávila, D.A., Lagunes, L.J., Castañeda, M.O.G., López, G.I., Aguilar, B.U., Román, P.H., Villagómez, C.J.A., Aguilera, S.R., Quiroz, V.J., Calderón, R.R.C. (2002). Manejo de ganado bovino de doble propósito en el trópico. Libro Técnico No. 5, Segunda Edición, México.

Román, P.H., Aguilera, S.R., Rodríguez, Ch.M.A. (2024). Importancia y estructura de la ganadería bovina de doble propósito en México. XXIII Simposio de Ganadería Tropical: Sistema Bovinos Doble Propósito. *Publicación Especial Núm. 13; Veracruz Méx.* Pg. 75 a 82.

Román, P.H., Rodríguez, Ch.M.A., Espinosa, G.J.A., González, O.T.A., Vélez, I.A., Zárate, M.J.P., Valdovinos, T.M.A., Aguilera, S.R.C., Guarneros, A.R., Santos, E.R., Bueno, D.H.M., Aguilar, B.A. (2021). Historia y perspectivas del modelo GGAVATT (Grupos Ganaderos de Validación y Transferencia de Tecnología). *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 12(Supl 3):286-307.

Thornton, P.K., and Herrero, M. (2010). Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *PNAS* 107(46):19667-19672

Villagómez, A.M.E., Villa, G.A., González, P.E. (2024). Efectos de la alimentación y el amamantamiento sobre el anestro posparto en vacas de doble propósito. *Publicación Especial Núm. 13; Veracruz Méx.* Pg. 19 a 27.

GANADERÍA REGENERATIVA, UN MODELO DE TRANSICIÓN A PRÁCTICAS SUSTENTABLES EN SISTEMAS DE LECHERÍA FAMILIAR PARA LOS ALTOS DE JALISCO

Christian Humberto Casillas Gómez^{1,2}

Darwin Heredia Nava¹

¹Departamento de Ciencias Pecuarias y Agrícolas,
Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara

²ANS de México, Asesoría en nutrición sustentable



El pasto, el suelo y la vaca interactúan de manera correcta para mantener ese equilibrio en la pradera

Introducción

La actividad ganadera como parte de las diversas actividades antropogénicas ha contribuido a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la desertificación, la disminución de la biodiversidad, incendios y cambio climático (El-Hage, 2022). De acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación, se hace mención que los bosques, los incendios, las sequías y otras formas de degradación de la tierra cuestan a la economía mundial hasta quince billones de dólares cada año y están profundizando la crisis del cambio climático.

La desertificación es resultado de la pérdida de biodiversidad; y sin revertir la desertificación global provocada por el hombre, no será posible abordar con éxito muchos problemas globales relacionados con el cambio climático, principalmente (El-Hage, 2022).

Las publicaciones de André Marcel Voisin, escritas de 1957 a 1963, Productividad de la hierba, La vaca y la hierba, Dinámica de los pastos, La tetania de los pastos y Suelo, pasto y cáncer (Viteri, 2020), aportaron a la conservación, producción de forrajes y alimentación de la vaca sin daño al ambiente, considerándose un importante legado y resumiendo sus aportaciones en las leyes universales del pastoreo racional Voisin (PRV), donde dicho autor resumió de manera práctica cómo es que el pasto, el suelo y la vaca interactúan de manera correcta para mantener ese equilibrio en la pradera.

Aunado a lo anterior, en los Altos de Jalisco se han utilizado herramientas ajustadas a las demandas propias del sistema de producción, donde se ha podido ver que en sistemas de producción de leche en pequeña escala se han mejorado las condiciones productivas, además de recuperar suelos degradados, con el uso y manejo de ganadería regenerativa como principal herramienta, además de empezar con la recuperación de ecosistemas, donde el productor de los Altos de Jalisco produce leche en convivencia con la naturaleza, mejorando sus condiciones de vida.

Ganadería y medio ambiente

En los últimos años, la ganadería en general se ha visto señalada como responsable de 18% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la fisiología digestiva del rumiante. La agricultura, caracterizada por prácticas de monocultivos, uso de maquinaria, agrotóxicos, fertilizantes de origen sintético, tala indiscriminada de árboles y quema de bosques, entre otras actividades del hombre, contribuyen a la degradación ambiental (Viteri, 2020).

Para muchos ambientalistas, el ganado es uno de los principales culpables de la deforestación de las selvas, degradación de los suelos y el problema en el aumento de GEI en la atmósfera, particularmente en las áreas tropicales. Si bien es verdad que el mal manejo del ganado, sea en ganadería industrial o extensiva convencional resulta nociva para el medio ambiente, también parece ser verdad que otro tipo de ganadería es posible y que puede ayudarnos a recuperar ecosistemas vitales para el planeta

La ganadería regenerativa se puede describir como un sistema ganadero donde el conjunto de prácticas y estrategias implementadas favorecen y permiten la regeneración del ecosistema y la economía del ganadero

(Viteri, 2020). Aunado a lo anterior, la emergencia climática está impulsada en parte por la agricultura industrial que genera más de 75 mil millones de toneladas de suelo erosionado al año, quema anual de miles de millones de hectáreas de pastizales, quema periódica de millones de hectáreas de bosques para criar ganado o cultivos para alimentar al ganado (El-Hage, 2022).

Lo que se ha propuesto para enfrentar tales desafíos por parte de universidades, gobiernos, corporaciones y organizaciones ambientalistas, incluye reforestar, destinar en los predios ganaderos áreas de tierra con fines de conservación y modificar los hábitos de consumo alimenticio (El-Hage, 2022).

Si bien los problemas ambientales a los que actualmente nos enfrentamos como civilización comienzan desde la pérdida de suelos, incendios, la consecuente desertificación y el cambio climático, la solución reside en los gobiernos y en otras grandes instituciones a través del desarrollo de políticas, en un contexto holístico que utiliza a la ganadería como una herramienta para la regeneración de la tierra a través del enfoque del pastoreo planificado holístico –u otras versiones mejoradas de pastoreo– (El-Hage, 2022).

Ganadería regenerativa

La ganadería regenerativa se puede describir como un sistema ganadero, donde el conjunto de prácticas y estrategias implementadas favorecen y permiten la regeneración del ecosistema y la economía del ganadero, estando diseñada y llevada a cabo de forma más parecida a como se desarrollaría de manera natural. El objetivo principal es buscar el máximo beneficio sostenible por hectárea, donde el hombre deberá de tomar diversas herramientas y/o estructuras en sus fincas para imitar la dinámica de movimiento de grandes manadas y así poder

estimular la relación estrecha que existe entre suelo, planta y herbívoro.

Una de las principales características de la ganadería holística es lograr mimetizarse con la naturaleza y ser uno con la dinámica de los ecosistemas con que se esté interactuando. Hay que considerar que parte del éxito está basado en la racionalidad del ganadero u operador de sistema, ya que es quien ejecuta las prácticas, por lo que es necesario una comprensión clara de los flujos de energía y circulación de nutrientes en el ecosistema. Viteri (2020) señala que en un sistema de ganadería regenerativa bien gestionada, una hectárea es capaz de captar en un día un equivalente a la misma cantidad de carbón (C) emitido por una vaca adulta durante todo un año.

Se ha alineado una corriente en torno a los sistemas de pastoreo racionales en la ganadería regenerativa, la cual busca beneficios y soluciones para el medio ambiente, el productor y el consumidor. En primera instancia, la carga animal (CA) por hectárea (Ha) se incrementa, generando una mayor acumulación de materia orgánica (MO), la cual a su vez incrementa la capacidad de retención de agua, manteniendo la humedad por un tiempo más prolongado, reduciendo la necesidad de riegos en época de estiaje (Viteri, 2020). Además de un sistema pastoril acompañado de la presencia de gran número de árboles que son aliados en la captura de CO₂ y N, también representan un elemento clave para el bienestar animal (Viteri, 2020).

Aunado a lo anterior, el manejo de los animales domésticos en forma de manada tiende a mejorar el suelo, para así mejorar la captura de CO₂ gracias a la fotosíntesis, donde se secuestra en el subsuelo en forma de humus o será usado por la planta a manera de C líquido para mantener la simbiosis con los microorganismos presentes en el suelo (Jones, 2008).

No es la vaca, si no cómo la manejamos

Respecto a la ganadería regenerativa, no podemos dejar de mencionar a Allan Savory, quien sentó las bases y principios del manejo holístico, el cual busca imitar en los ecosistemas de pastizales que existían antes de que el hombre los degenerara con el sobrepastoreo tradicional; enormes manadas de herbívoros silvestres (bisontes, ñus, búfalos de agua, búfalo africano, elefantes) vagaban por las enormes praderas, pero los grandes depredadores carnívoros que las seguían, las mantenían en movimiento constante y en grupos compactos. Este movimiento continuo roturaba la tierra e impedía que el pasto fuera sobreexplotado y además esparcía los beneficios de los rumiantes (estiércol y su orina, que servían de nutrientes a las plantas) por todo el ecosistema (El-Hage, 2022).

En este contexto, las herramientas que tenemos para gestionar el suelo y revertir la desertificación son: tecnología, descansar el medio natural y enriquecerlo con organismos vivos diversos (árboles, plantas, micro-organismos, etcétera). La herramienta adicional es la buena gestión del ganado a través del pastoreo que proporciona impacto animal, lo cual, para una pradera, tanto el exceso como la falta de pastoreo, son considerados nocivos en el modelo. La gestión racional por parte del ganadero u operador de sistema es necesaria, con una comprensión clara de los flujos de energía y circulación de nutrientes en el ecosistema.

La mayoría de nosotros puede pensar en el pasto como algo que se corta y se renueva constantemente, pero en realidad lo que muda es la parte visible de la planta, mientras que las raíces de un pasto (perenne) viven muchos años y pueden resistir las sequías y el frío manteniéndose en estado latente hasta que mejoran las condiciones ambientales (El-Hage, 2022). En la ganadería con sobrepastoreo, muchas de las veces no se le da oportunidad al pasto para crecer nuevos brotes, donde la planta termina por morir.

Por otro lado, el sobredescanso por la ausencia de animales de pastoreo también lleva a la degradación del pastizal, debido a que los animales cumplen tres funciones básicas en la zona de pastoreo: a) revolver el suelo con sus pezuñas, permitiendo que sea más poroso y pueda retener mejor el agua, al mismo tiempo que permite que más nutrientes penetren el suelo; b) contribuir con su estiércol y orina al microbioma del suelo, que funciona como abono; y c) consumir las partes sobrantes de la planta, pues cuando

el pasto crece y no se corta, las partes más altas se oxidan y ahogan a los brotes nuevos, que necesitan espacio y luz para crecer.

André Marcel Voisin y las cuatro leyes universales del pastoreo

André Marcel Voisin, físico-químico de origen francés, quien laboraba en una fábrica de caucho en las décadas de 1920 y 1930, participó al principio de la Segunda Guerra Mundial, pues en 1940 retornó a Francia, donde decidió administrar una finca de 130 ha, propiedad de su familia, dedicándose de lleno a la ganadería, para pocos años después crear y organizar una cooperativa de recolección y distribución de lácteos de 1949 a 1954.

Durante sus años de ganadero observó cómo se relacionaba el suelo, el pasto y la vaca, y años después estableció sus cuatro leyes universales del pastoreo racional, además de escribir diversos libros y documentos que lo llevarían a ser reconocido en varios países, siendo en Cuba donde llegó su muerte en 1964, dejando un legado en cuanto al pastoreo racional Voisin (Viteri, 2020). Estas cuatro leyes son:

1. Ley del reposo. “Para que una hierba cortada por el diente del animal pueda dar su máxima productividad, es necesario que, entre dos cortes a diente sucesivos, haya pasado el tiempo suficiente que pueda permitir al pasto almacenar en sus raíces las reservas necesarias para un rebrote vigoroso y lograr realizar su llamada de crecimiento” (Viteri, 2020).

2. Ley de la ocupación. “El tiempo global de ocupación de una parcela debe ser lo suficientemente corto para que una hierba cortada a diente en el primer día, no sea cortada de nuevo por el diente de los animales antes de que éstos dejen la parcela” (Viteri, 2020).

3. Ley de los rendimientos máximos. “Es necesario ayudar a los animales de exigencias alimenticias más elevadas para que puedan cosechar la mayor cantidad de hierba y para que ésta sea de la mejor calidad posible” (Viteri, 2020).

4. Ley de los rendimientos regulares. “Para que una vaca pueda dar rendimientos regulares es preciso que no permanezca más de tres días en una misma parcela. Los rendimientos serán máximos si la vaca no permanece más de un día en una misma parcela” (Viteri, 2020).

Ganadería regenerativa para la producción de leche en los Altos de Jalisco

La ganadería regenerativa para la producción de leche en los Altos de Jalisco tuvo su origen en la ciudad de Tepatitlán de Morelos Jalisco, ciudad que cuenta con una superficie de 1,387.76 km², se ubica geográficamente entre las coordenadas 20°48'59.76" N y 102°45'39.96" a 1,810 msnm, con una precipitación promedio anual de 878.8 mm³ que comprende desde junio (ocasionalmente finales de mayo) hasta septiembre (pudiéndose extender hasta octubre), y una temperatura promedio de 18.3 °C (INEGI 2021). Los datos que aquí se presentan son resultado de una evaluación de varios años en dos unidades de producción pecuaria dedicadas a la producción de leche, “Rancho El Progreso” y “Rancho El Bramido”, desde 2015, y cuyas metodologías fueron adaptadas al contexto regional en la producción y que los autores han nominado Ganadería Regenerativa Lechera Alteña (GRLA).

Los Altos es una región muy característica de Jalisco, el cual a su vez es el estado que más leche produce en México, con producciones mayores a los 2,000 millones de litros anuales en un país con producciones aproximadas a 13,594 millones de litros (SIAP, 2025). En este contexto, cabe mencionar que la gran mayoría de productores de leche en los Altos de Jalisco entran en una caracterización de pequeña y mediana escala con mano de obra familiar, lo cual cobra gran relevancia en diversos aspectos, no sólo en lo productivo, si no en lo económico, ecológico y social.

El GRLA, como tal, es un acúmulo de metodologías puestas en práctica para lograr una transición gradual y efectiva para la adopción de prácticas de ganadería regenerativa. Uno de los puntos críticos en dicha transición es la manera en que el productor de leche alteño (en sistemas de producción familiar) percibe su actividad productiva a un nivel ecológico, social, moral y económico, para así lograr una transición de una administración basada de un máximo rendimiento por individuo a una producción basada en el máximo rendimiento sostenible por unidad de superficie, teniendo como objetivo principal el incremento en el número de animales que puedan soportar de manera sostenible sus agostaderos.

Aunado a lo anterior, la ganadería regenerativa en leche propone un aprovechamiento eficiente de los recursos naturales presentes en las hectáreas de los establos que muy a menudo se ven abandonadas o mal aprovechadas, donde es de vital importancia dirigir la transición o el

uso de nuevas metodologías de regeneración basadas en el conocimiento de problemáticas que aquejan a la producción a nivel regional, cubrir con los requerimientos de las empresas que acopian la leche (volumen diario, calidad, etcétera) y ver a la ganadería regenerativa no como un fin, sino como un elemento más en las operaciones de la unidad de producción, donde el ganadero se verá sustancialmente beneficiado de alguna manera, sea mano de obra, ingesta de alimento de sus animales, horas de trabajo en el sistema de producción (Próspero-Bernal *et al.*, 2020).

Las teorías que son la base de la ganadería regenerativa lechera alteña

Son principalmente tres: Pastoreo racional Voisin (PRV), manejo holístico y pastoreo de ultra alta densidad (PUAD). En el entendido de la singularidad de cada establo, con cada situación que se presentan a menudo, también se consideran teorías alternas aplicables en acompañamiento técnico de las metodologías, ya que el principal eslabón de esta cadena es el ganadero u operador del sistema, a quien se le debe guiar con un pensamiento holístico, introducirlo al desarrollo sustentable y tener en cada proyecto como principal objetivo el ser sostenible, y por ello, las teorías anexas a la ganadería regenerativa para la producción de leche en los Altos de Jalisco son: el diseño Key Line para maximizar el recurso hídrico de las escorrentías, desarrollado por Percival Yeomans; los principios de agricultura natural o ecológica de Masanobu Fukuoka; la vía del carbón líquido acotado por Christine Jones, y el pastoreo no selectivo definido por John Acocks.

Pilares en los que se sustenta el GRLA

- Apertura al cambio de pensamiento por parte del productor.
- Disciplina y observación continua por parte del productor.
- Ensilados de maíz de alto valor.
- Suplementación estratégica con concentrados de calidad y planificación de recursos forrajeros.
- Diversificación en las operaciones (Beef on dairy, avicultura a libre pastoreo, apicultura, agroforestería, etcétera).
- Reforestación (árboles nativos preferentemente).
- Objetivos claros en un plan genético (animales adaptados al clima del lugar donde se produce y resistencia a ectoparásitos).



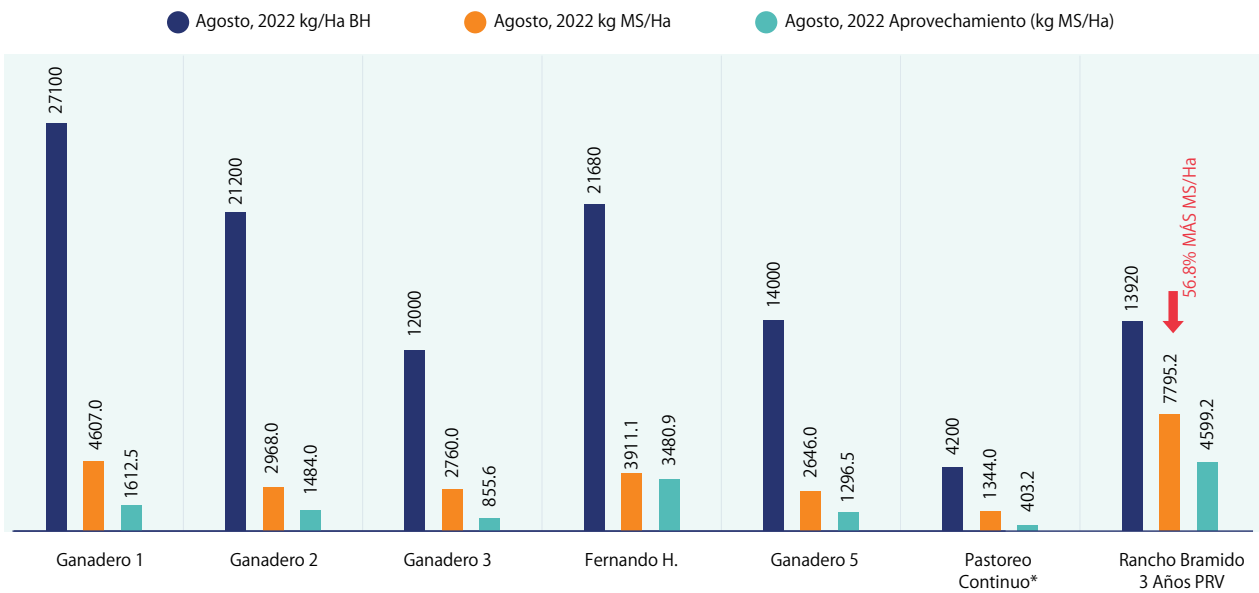
Problemáticas a tratar con la implementación del GRLA

- Valor de la tierra cada vez más elevado (rentas).
- Menos hectáreas disponibles para producir forrajes de calidad.
- Cubrir la demanda de ensilados de maíz de calidad.
- Temporal de lluvias errático.
- Sequías severas.
- Degradación de los suelos en parcelas y agostaderos.
- Menor rentabilidad por los costos de alimentación.
- Recursos naturales mal administrados en agostaderos (abandono).

Existe gran cantidad de establos en los Altos de Jalisco con hectáreas de agostadero disponibles para poder cosechar algo de biomasa de manera fácil, pero el interés

o el potencial de cosecha de biomasa para producir leche no se detona debido a prácticas inadecuadas de manejo ganadero; las prácticas regenerativas contribuyen a observar una mejor respuesta en la biomasa ofertada en el agostadero, lo cual es una mejoría sustancial en el suelo, lo que da como respuesta una mejor cosecha de forraje; y si bien es una excelente señal de ir por buen camino hacia la regeneración de los suelos, es necesaria esa correcta gestión en el manejo del ganado para lograr los consumos deseados de materia seca ofertada (en calidad y cantidad), lo cual además genera un alivio económico al ganadero. No sólo es regenerar, sino también realizar maniobras efectivas para lograr convertir en dinero la biomasa ofertada en el agostadero de manera eficiente y sin causar ningún tipo de perjuicio, lo cual requiere maniobras adecuadas de manejo del cerco eléctrico (figura 1).

Figura 1. Acúmulo neto de forraje y aprovechamiento de oferta forrajera con PRV en el rancho el Bramido vs establos lecheros del Proyecto Margarita con reciente adopción del PRV y pastoreo continuo, agosto 2022



BH: base húmeda, MS: materia seca. Aprovechamiento: forraje consumido por el ganado.
*Datos a un corte o rotación mensual (asumiendo que se pueden lograr hasta dos cortes mensuales en las mejores condiciones de lluvia y manejo).
Fuente: Información propia de los autores.

Propuesta de calendarización en los manejos y metodologías para emplear en los agostaderos de establos lecheros de los Altos de Jalisco

a) Lluvias: junio-septiembre o principios de octubre

Rotaciones rápidas al sistema (tercera y cuarta ley de Voisin) llevadas a la práctica con observaciones cercanas

de los potreros y ganado por parte del productor u operador del sistema. Comenzar con rotaciones limitantes para el adecuado acondicionamiento del rumen, ya que éste viene de una época de estiaje y suele haber cambios repentinos al consumo de pastos succulentos sin previa adaptación de los microorganismos presentes en el rumen.

b) Transición: tercera semana de octubre-febrero

Comenzar por desacelerar las rotaciones al sistema con las últimas lluvias del año (volver a tres días por subdivisión). Ajuste de ración por cambio de estación (el ganado comerá menos materia seca en el agostadero). Ésta es una época idónea para interseembra o renovación de pasturas en agostadero (usar PUAD). Decremento de horas luz y desaceleración de rebrotes de pastos perennes, el ganado se vuelve selectivo (usar PUAD).

c) Estiaje: febrero-mayo o hasta el retorno del temporal de lluvia

Rotaciones muy lentas al sistema, usar pastoreo de ultra alta densidad, en caso de estar comenzando, sólo hacer impacto animal ayudado del PUAD, perturbar lo menos posible el suelo, una opción es el uso del área común y pasillos.

Conclusión

La implementación del GRLA en la región de los Altos de Jalisco es una herramienta efectiva de transición a prácticas sustentables en los establos lecheros, teniendo como bases el pastoreo racional Voisin y el pastoreo de ultra alta densidad, aunado a un pensamiento holístico y el cambio en la autopercepción del rol que juega el productor de leche a nivel ecológico, económico y social.

Se debe considerar que las prácticas que se utilizan nos han hecho dependientes de insumos cuya gestión de producción y trasportación coadyuvan a los problemas

climáticos que afectan a nivel global; por tanto, mejorar en el uso de productos locales que se requieran para la producción, buscando que sean más amigables con el ambiente, además de incrementar los ingresos al implementar la diversificación en las fincas, buscando de alguna forma afrontar los mercados fluctuantes que se presentan en el sector lechero.

Por último comentar que es importante considerar que las prácticas regenerativas impactan en el animal, en el ambiente y en el producto final, considerando el bienestar animal, la obtención de alimentos de alto valor, la captación de agua y un alto secuestro de C en los suelos y la biomasa vegetal.

Agradecimientos

A los primeros ganaderos productores de leche en pequeña escala que nos abrieron las puertas para replicar esta tecnología, Rancho “El Bramido” de don Adán Contreras y eMVZ Joaquín Contreras, Rancho “El Progreso” del ISP Fernando Hernández, siendo estos dos lugares los pilares en los que se sustenta la metodología del GRLA. A Danone, quien por medio de Proyecto Margarita y Nuup logró difundir de mejor manera, a más ganaderos, la metodología creada para la región de los Altos de Jalisco. A la Universidad de Guadalajara, casa máxima de estudios de Jalisco, dónde se ha encontrado un centro importante de aprendizaje y apoyo académico.

Referencias

El-Hage N. (2022). Managing livestock production and consumption. Capítulo 12. Livestock as a tool to regenerate land. Elsevier Pp: 155-162.

INEGI, 2021. Instituto de información estadística y geográfica de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco diagnóstico del municipio. Web: www.iiig.gob.mx. Fecha de consulta 7 de septiembre de 2024.

Jones C. (2008) Liquid Carbon Pathway. Australian Farm Journal Edición 338 3 Julio 2008.

Prospero-Bernal F., López-González F., Martínez-García C.G., Arriaga-Jordán C.M. (2020). Evaluación de la sostenibilidad entre 2010 y 2015

de sistemas de producción de leche en pequeña escala en el altiplano central de México. ITEA-Inf. Tec. Econ. Agrar.

SIAP, 2025. [en línea]. Producción ganadera. Disponible en la Web: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria> Fecha de consulta 27 de enero de 2025.

Viteri L. 2020. Ganadería tropical paso a paso, beneficios para el ambiente, el productor y el consumidor. Primera edición. Columbia SC. Volumen 1. Pp: 17-42.

20

HACIA LA CIRCULARIDAD DE LA CADENA DE PRODUCCIÓN LÁCTEA EN MÉXICO

Juan de Jesús Nava Navarrete¹

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México



Los sistemas productivos circulares se basan en el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles y la reutilización del desperdicio, formando un ciclo en el que insumos alimenticios y subproductos se transforman en alimentos sanos y nutritivos para el consumo humano

Los sistemas alimentarios circulares son reconocidos a nivel mundial por su potencial para impulsar la transición hacia modelos de producción más sostenibles. Estos sistemas se caracterizan por: 1) la minimización del uso de recursos finitos, como el agua, a través de sistemas de riego eficientes, o la energía, mediante el uso de fuentes renovables; y 2) la reutilización y el reciclaje de nutrientes presentes en los flujos residuales, como la biomasa no aprovechable de las cosechas o el compostaje de residuos sólidos orgánicos para mejorar la fertilidad del suelo.

De los sistemas alimentarios circulares, los de producción animal son una excelente opción para el abastecimiento de alimentos de alto valor nutritivo para las personas. Estos sistemas productivos circulares se basan en el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles y la reutilización del desperdicio, formando un ciclo en el que insumos alimenticios y subproductos se transforman en alimentos sanos y nutritivos para el consumo humano, como es el caso de la leche y todos sus derivados (crema, quesos, yogur, etcétera).

En estos modelos de producción pecuaria circulares, en lugar de desechar los distintos residuos de la producción de alimentos, como los restos de cosechas (frutas, verduras, hortalizas y semillas no seleccionadas para consumo humano), subproductos de la industria alimentaria (tortillería, galletería, otras) o los residuos orgánicos (heces y orina), se busca que éstos sean utilizados para complementar directamente la alimentación del ganado, optimizando los nutrientes disponibles y disminuyendo

la dependencia de insumos externos. Este enfoque de circularidad en la producción animal, particularmente de los sistemas de bovinos, ovinos y caprinos de producción láctea, contribuye a la sostenibilidad de los sistemas alimentarios, reduciendo considerablemente la creciente presión sobre recursos naturales finitos y decrecientes.

Además de optimizar el uso de subproductos en la alimentación del ganado, estos sistemas circulares buscan mejorar la gestión de los recursos forrajeros existentes, minimizando la competencia por el uso de la tierra con los cultivos destinados al consumo humano. Estos sistemas priorizan el uso eficiente de pastizales y cultivos forrajeros, a fin de evitar la competencia directa entre la producción de cultivos aptos para el consumo humano, por un lado, y los forrajes destinados al ganado por el otro. Así, los sistemas circulares privilegian el uso de tierras con vocación agrícola para la producción de biomasa destinada a la alimentación humana. Un ejemplo es la reducción del cultivo de soja con fines pecuarios, dado que actualmente dicho grano se emplea tanto en la alimentación humana como en la formulación de dietas para la producción de cerdos y aves.

En los últimos años, el consistente incremento en la demanda de productos de origen animal, impulsada principalmente por el crecimiento de la población mundial, el aumento del ingreso per capita y ciertos patrones alimenticios, plantea nuevos retos para la sostenibilidad de los sistemas alimentarios. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima que la demanda de productos lácteos y

La transición a la circularidad requiere de la participación y compromiso de productores, procesadores, comercializadores y consumidores, además de todo el entorno institucional, asegurando que las iniciativas sean viables, integrales y equitativas

derivados aumentará en 58% para 2050. Esto impulsará la necesidad de contar con modelos de producción pecuaria con enfoques circulares.

En la transición hacia la circularidad es fundamental contar con estrategias de comunicación que permitan mejorar la comprensión sobre el concepto de circularidad y sus principios. Estas estrategias deberán apoyar un lenguaje claro y compartido que permita identificar los beneficios para todos los participantes de la cadena productiva. Así, tanto productores como consumidores podrán comprender que la circularidad va más allá del reciclaje, ya que también implica reducir la generación de desperdicios y aprovechar al máximo los recursos en cada etapa de la cadena, promoviendo así sistemas más eficientes y sostenibles.

En este contexto, el presente capítulo explora diversas rutas y beneficios para un sector con gran potencial para aplicar los principios de circularidad: la producción láctea de México. Esta revisión permitirá identificar qué elementos de circularidad ya están presentes, detectar nuevas oportunidades y definir posibles rutas de intervención para el futuro. Afirmo que, en este proceso hacia la circularidad, no sólo es clave minimizar el desperdicio y reciclar subproductos, sino también fomentar prácticas productivas ambientales, sociales y económicas más sostenibles. La transición requiere de la participación y compromiso de productores, procesadores, comercializadores, consumidores, además de todo el entorno institucional, asegurando que las iniciativas sean viables, integrales y equitativas.

Elementos clave para favorecer la transición hacia la circularidad de la cadena de producción láctea en México

Las prácticas fundamentales son:

- Conservación de los ecosistemas naturales remanentes.
- Alto total a la deforestación.
- Intensificación sostenible de la producción y adopción de prácticas productivas agroecológicas, con son la rotación de potreros, diversificación de especies forrajeras, bancos de proteínas (leucaena, morera, alfalfa).
- Uso de biofertilizantes orgánicos, control integral de parásitos y plagas.
- Aprovechamiento de residuos orgánicos en la generación de bioenergía (biodigestores de biogás).

Oportunidades

Los sistemas silvopastoriles en México pueden ser estrategias fundamentales para favorecer modelos más circulares en la producción láctea. Estos sistemas reciclan nutrientes a través de la aplicación de hojarasca, la fijación biológica del nitrógeno, así como de la actividad de insectos benéficos, como los escarabajos estercoleros, que mejoran la fertilidad del suelo y reducen la dependencia de insumos externos. Además, los diversos estratos de árboles, arbustos y pastos presentes optimizan el uso de nutrientes, luz y agua, aumentando la productividad ganadera y mejorando el bienestar animal. Su implementación, en

unidades productivas y a nivel regional puede fortalecer los ecosistemas y mejorar la sostenibilidad de la ganadería lechera, particularmente la de práctica extensiva.

Consideraciones

Los sistemas de producción ganadera deben establecerse, idealmente, en zonas agrícolas no aptas para cultivos destinados al consumo humano. Esto para evitar la competencia entre la producción de alimentos y la de forrajes, así como para favorecer la circularidad. En regiones con vocación agrícola, la prioridad deberá centrarse en la producción de alimento vegetal para consumo humano. Posteriormente, considerar los sistemas agrosilvopastoriles, modelos mixtos de agricultura y ganadería y esquemas de policultivo, asegurando un uso más eficiente y sostenible del suelo.

Limitantes

Una parte importante de la producción de leche en México se realiza a pequeña y mediana escala en sistemas extensivos y semiextensivos, donde comúnmente no es factible gestionar adecuadamente los residuos orgánicos. La naturaleza extensiva de estos sistemas dificulta tanto su recolección, almacenamiento y tratamiento, abarcando, tanto los residuos sólidos, como el estiércol y líquidos como la orina o el agua utilizada en la limpieza. Por ello, es fundamental fortalecer la organización a nivel regional, donde las asociaciones y uniones ganaderas desempeñan un papel clave. Estas agrupaciones de productores pueden facilitar el manejo conjunto de los subproductos, compartir y difundir prácticas que favorezcan la circularidad y trabajar de manera coordinada con instituciones públicas y privadas para mejorar la sostenibilidad del sector lácteo.

Introducción a la circularidad

El sistema alimentario global tiene actualmente un enorme impacto ambiental. Se estima que libera aproximadamente una cuarta parte de todos los gases de efecto invernadero (GEI) de las actividades humanas. También es responsable de un tercio de la acidificación terrestre, así como de la mayoría de los procesos de eutrofización de los cuerpos de agua (exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, que causan un crecimiento excesivo de algas, lo que daña la vida acuática) y además ocupa cerca de 40% de la superficie terrestre libre de hielo y desiertos (Willett *et al.*, 2019).

En conjunto, el sistema pecuario domina estas emisiones antropogénicas del sistema alimentario, siendo responsable de entre 56% y 58% del total de éstas (Poore *et al.*, 2018). Utiliza, además, la mayoría de la tierra cultivable, pues abarca 40% de las tierras agrícolas del mundo. Parte de esta tierra se utiliza para producir alimentos de alta calidad para consumo de los animales y que los seres humanos también podríamos consumir, como el maíz y la soja, lo que resulta en una competencia directa y creciente por el uso del suelo y otros recursos naturales (Mottet *et al.*, 2017).

Ante este panorama, la producción pecuaria a nivel global, regional y local requiere una transición hacia la circularidad y, por tanto, un cambio de paradigma, ya que la industria alimentaria dominante está construida en torno al modelo lineal “extraer-producir-distribuir-consumir-desechar”. Para comprender las necesidades e implicaciones de esta transición hacia la circularidad, es necesario profundizar y construir una visión compartida sobre lo que implica la circularidad en los sistemas alimentarios en general y, dada su relevancia en nuestro país, en el sistema de producción láctea en particular.

Conceptos y definiciones

El concepto de circularidad se origina en la ecología industrial, orientado hacia la reducción en el consumo de recursos y la emisión de residuos al ambiente mediante el cierre de los ciclos de materiales y sustancias (Ghisellini *et al.*, 2016). Bajo este paradigma, se busca prevenir las pérdidas de materiales y sustancias o, en su defecto, recuperarlos para su reutilización y reciclaje. Con base en estos principios, avanzar hacia la circularidad en los sistemas alimentarios implica integrar prácticas y tecnologías que minimicen la utilización de recursos finitos (suelo, agua y nutrientes), fomenten el uso de fuentes de energía renovable (eólica y solar), prevengan la pérdida de elementos esenciales dentro del sistema alimentario (nitrógeno, fósforo, agua y biodiversidad) y procuren la reutilización y el reciclaje de los flujos residuales, de tal forma que se agregue el mayor valor posible al sistema alimentario (Jurgilevich *et al.*, 2016).

La circularidad se convierte en un modelo clave para transformar los sistemas alimentarios hacia la sostenibilidad. Un sistema alimentario circular busca:

a) Minimizar el uso de recursos finitos y limitados, como las tierras de cultivo, mediante prácticas agroecológicas y regenerativas, que favorecen la fertilidad

del suelo, la presencia de biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas.

b) La preservación de nutrientes esenciales como el fósforo, a través de la recuperación y reutilización de fósforo presente en estiércol y otros residuos orgánicos.

c) Minimizar las pérdidas de nutrientes a lo largo de distintos eslabones de la cadena productiva, desde la producción primaria hasta el consumo y la gestión de residuos.

d) Maximizar su recuperación para su reutilización como alimentos, forrajes, fertilizantes o biomateriales (De Boer *et al.*, 2018; Harder *et al.*, 2021).

En el caso de la producción láctea, la circularidad no sólo es deseable, sino también necesaria para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. En un sistema circular de producción láctea se busca sustituir insumos primarios con alta intensidad de emisiones de GEI, como concentrados (cuya producción requiere un alto uso y consumo de recursos) y fertilizantes minerales (que generan emisiones de óxido nítrico), por alternativas más sostenibles, incluyendo alimentos provenientes de insumos recuperados o reciclados (como subproductos de la industria alimentaria) y biofertilizantes derivados del estiércol. Tales ajustes permiten que los sistemas de producción pecuaria circulares contribuyan al desarrollo de prácticas productivas de bajas emisiones y resilientes al cambio climático (Vergara *et al.*, 2019).

La circularidad contribuye a reducir pérdidas y desperdicios de alimentos, así como los efectos negativos ambientales asociados a distintos eslabones de la cadena láctea, dado que el concepto de circularidad se basa en el principio de prevenir las pérdidas de nutrientes y revalorizar los nutrientes de los flujos residuales (Boldrin *et al.*, 2009).

Sistemas circulares: beneficios globales y locales

Los sistemas de producción animal, particularmente los dedicados a la producción de lácteos, tienen una gran capacidad para recuperar y aprovechar nutrientes que, de otro modo, se perderían como flujos residuales. Estos sistemas permiten que bovinos, ovinos y caprinos consuman pastos de tierras no aptas para otros cultivos y transformen esta biomasa vegetal en alimentos nutritivos para las personas, como la leche y sus derivados. De esta forma, la producción láctea, al integrar los principios de circularidad,

no sólo contribuye a la seguridad alimentaria, sino que también disminuye la contaminación, la competencia por recursos y, en consecuencia, su impacto ambiental.

Más allá de estos beneficios ambientales, los sistemas circulares en la producción láctea también presentan importantes ventajas socioeconómicas. En un contexto global, la transición hacia sistemas circulares de producción láctea representa una oportunidad para fortalecer la autosuficiencia de los sistemas productivos. Al disminuir la dependencia de insumos externos, como concentrados, fertilizantes y energía, además de fomentar el uso óptimo de recursos locales y renovables, los sistemas circulares de producción láctea contribuyen a reducir los costos de producción, generar empleo local y fortalecer el ingreso y la economía de las familias de comunidades rurales.

Esta mayor autosuficiencia de los sistemas de producción reduce la vulnerabilidad ante fluctuaciones en los mercados, marcados por el aumento generalizado en los precios de insumos, fertilizantes y combustibles, y mejora la seguridad alimentaria a nivel local y regional, al garantizar un acceso más asequible a alimentos nutritivos para las comunidades rurales en las que se practica (Parodi *et al.*, 2022).

En línea con estos beneficios, diversos estudios han modelado la contribución potencial de los sistemas alimentarios circulares en el fomento de la seguridad alimentaria, así como en la reducción de las huellas ambientales generadas por el ganado en la producción de alimentos para las dietas humanas a nivel mundial (Van Selm *et al.*, 2022). Estos estudios han servido de base para el desarrollo de instrumentos de política pública que orientan la transición hacia sistemas alimentarios circulares, como los implementados en la Unión Europea (Van Berkum *et al.*, 2019).

De forma similar, se trabaja en impulsar iniciativas que propician el desarrollo y la implementación de la circularidad en la producción de alimentos en otros países y continentes, como las promovidas por la red de colaboración mundial The Circular Food Systems network: GRA-IRG. Esta red, en su sitio electrónico, destaca que en los sistemas alimentarios circulares se busca que las pérdidas de materias primas en la producción de biomasa se reduzcan al mínimo al seguir un ciclo cerrado en el que toda la biomasa producida se utiliza al máximo.

Se trata de un enfoque que busca abarcar el sistema completo y que considera las partes individuales del



sistema alimentario como elementos de un todo. Este enfoque del sistema alimentario es más que la suma de sus partes, ya que la interacción entre las diferentes partes del sistema da como resultado una mayor eficiencia de los recursos.

Rutas hacia la circularidad en la cadena de producción láctea

La biomasa vegetal que aporta la tierra constituye la base del sistema alimentario, tanto para el consumo humano como para el animal. Sin embargo, además de la producción de alimentos, la biomasa puede destinarse para otras funciones, como la producción de bioenergía, fármacos, productos bioquímicos, fibras, entre otras. Es en este contexto, que la priorización en el uso de las tierras cultivables y de la biomasa forma parte esencial de las rutas de la transición hacia la circularidad en la cadena de producción láctea.

Esto representa un cambio de paradigma exigiendo el desarrollo de estrategias integrales y multidisciplinarias. En tal sentido, esta transformación no sólo implica ligeros ajustes en las prácticas productivas, sino una reevaluación de cómo se gestionan los recursos e insumos; y cómo se aprovechan los residuos y subproductos.

A continuación, presento las rutas principales hacia la circularidad del sector lácteo, analizando los posibles beneficios ambientales, económicos y sociales que pueden derivarse de ellas.

Ruta 1. Optimización del uso de recursos finitos

Esta ruta se centra en minimizar el uso de recursos como tierra, agua y nutrientes en la producción de forraje y en la alimentación del ganado. Se ha propuesto que, ante las necesidades actuales, la producción de alimentos deberá tener prioridad, a corto y mediano plazos, sobre otros usos de la biomasa, como la producción de bioenergía, ya que la energía puede generarse a partir de fuentes renovables, como el sol y el viento, mientras que la biomasa es, hasta ahora, la única fuente de alimentos.

Esto es particularmente relevante en los sistemas de producción de alimentos de origen animal, donde, a partir de biomasa vegetal, la tierra cultivable se utiliza principalmente para producir alimentos orientados a satisfacer las necesidades nutricionales de los seres humanos. Específicamente, los productos lácteos y cárnicos son reconocidos por aportar un porcentaje elevado de proteínas, calorías y micronutrientes esenciales,

muchos de los cuales resultan insustituibles (Van Zanten *et al.*, 2019).

Beneficios: reducción de la presión sobre los ecosistemas, disminución de costos de producción, mejora de la eficiencia en el uso de recursos.

Ruta 2. Valorización de subproductos y residuos

Esta ruta busca convertir los subproductos y residuos de la producción láctea en recursos aprovechables. La agricultura destinada a la producción de insumos para la alimentación animal genera una variedad de subproductos, como restos de cultivos (olotes, cañas, hojas de maíz), además de residuos provenientes del procesamiento industrial de alimentos (desechos de tortillerías, panaderías, entre otros) y residuos orgánicos de la producción animal. Como estos materiales no son aptos para el consumo humano ni pueden utilizarse de forma directa, su reincorporación en un sistema ganadero circular surge como una opción viable.

Si bien es clave disminuir la generación de subproductos y limitar el desperdicio de alimentos; cuando esto no sea factible, es necesario reciclarlos. Una opción para su reciclaje es emplearlos en la mejora de la calidad del suelo, la fertilización de cultivos o la alimentación de otros animales, como cerdos y aves. Un ejemplo es el suero de leche, rico en proteínas, lactosa, vitaminas y minerales, lo que lo convierte en un subproducto valioso para la alimentación de cerdos, especialmente lechones y animales en crecimiento.

Beneficios: reducción de la contaminación ambiental, generación de biofertilizantes, generación de nuevas fuentes de ingresos y reducción de costos de producción.

Ruta 3. Implementación de prácticas agroecológicas

Esta ruta promueve la integración de principios agroecológicos en la producción láctea, como la diversificación de cultivos, el manejo integrado de plagas y enfermedades, y la promoción de la biodiversidad. En un sistema circular es fundamental reconocer la importancia de elegir los cultivos futuros y sus rotaciones con base, no sólo en los productos principales, sino en sus productos secundarios y en su valor alimentario para el ser humano y su valor no alimentario para el suelo y para otros animales productivos.

Beneficios: mejora de la salud del suelo, aumento de la resiliencia de los sistemas productivos, reducción del uso de insumos externos.

La transición hacia sistemas circulares ofrece beneficios multidimensionales: para los productores, mayor eficiencia operativa y rentabilidad; para los consumidores, productos de alta calidad con menor huella ambiental; y para los ecosistemas, menor presión sobre los recursos naturales y de las emisiones de contaminantes

Ruta 4. Evaluación y monitoreo de la circularidad

Esta ruta se enfoca en la implementación de criterios e indicadores que permitan evaluar y monitorear el progreso hacia la circularidad en la producción láctea. Estos criterios e indicadores permiten capturar diferentes dimensiones de los impactos ambientales, como el consumo de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso del suelo, el uso del agua y la generación de residuos. En este sentido, una estrategia útil es la implementación de las distintas huellas ambientales asociadas con la producción pecuaria. Entre estas destacan la huella ecológica, la huella hídrica y la huella del carbono. En conjunto, estos criterios e indicadores permiten evaluar y monitorear las cadenas de valor alimentarias a escalas locales, regionales y globales (Kucukvar *et al.*, 2019).

Beneficios: permite identificar áreas de mejora, medir el impacto de las acciones implementadas y comunicar los avances a los diferentes actores.

Ruta 5. Incorporación de las dimensiones de la sostenibilidad

Esta ruta se centra en integrar las dimensiones social, económica e institucional en la transición hacia la circularidad en la producción láctea. Dentro de la dimensión social destaca la participación preponderante de los consumidores, la necesidad de educación e información clara y oportuna para aumentar la conciencia de la insostenibilidad de los patrones de producción y consumo alimentarios actuales y de valores sociales en favor de prácticas más sostenibles. En la dimensión económica se requiere de apoyos basados en el subsidio de iniciativas sostenibles considerando factores como el valor agregado, la diferenciación de productos y nichos de mercado especializados.

De igual manera, en lo concerniente a la dimensión institucional, destaca la participación gubernamental a través de la legislación sobre el establecimiento de límites claros de emisiones, el aumento de los impuestos sobre el uso de recursos finitos, la fijación de precios reales, el etiquetado, la reducción de impuestos, políticas públicas y subsidios para aquellos productores que transiten activamente hacia la circularidad en la producción de alimentos.

Beneficios: asegura que la transición sea justa, equitativa y sostenible en el largo plazo.

Conclusión

La demanda de productos y derivados lácteos en México continúa en aumento, generando presión en toda su cadena de producción, especialmente en la producción primaria. Dado que la actividad ganadera enfrenta importantes desafíos ambientales, sociales y económicos, transitar hacia una producción láctea más sostenible es una prioridad. El desarrollo de modelos de circularidad en este sector representa una oportunidad transformadora que va más allá de la simple utilización de los recursos.

Estos modelos replantean de forma integral los procesos productivos, donde los residuos se conviertan en recursos valiosos, minimizando la contaminación e impacto ambiental. La transición hacia sistemas circulares ofrece beneficios multidimensionales: para los productores, mayor eficiencia operativa y rentabilidad; para los consumidores, productos de alta calidad con menor huella ambiental; y para los ecosistemas, menor presión sobre los recursos naturales y de las emisiones de contaminantes. Esta transformación hacia la circularidad atiende las necesidades presentes del sector, y contribuye a un futuro más sostenible y próspero en la industria láctea mexicana.



Referencias

- Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H., & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 800-812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
- De Boer, I. J., & Van Ittersum, M. K. (2018). Circularity in agricultural production. Wageningen University & Research. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/470625>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Harder, R., Giampietro, M., & Smukler, S. (2021). Towards a circular nutrient economy: A novel way to analyze the circularity of nutrient flows in food systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, Article 105693. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105693>
- Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, 8(1), Article 69. <https://doi.org/10.3390/su8010069>
- Kucukvar, M., Onat, N. C., Abdella, G. M., & Tatari, O. (2019). Assessing regional and global environmental footprints and value added of the largest food producers in the world. *Resources, Conservation & Recycling*, 144, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.048>
- Mottet, A., De Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
- Parodi, A., Valencia-Salazar, S., Loboguerrero, A. M., Martínez-Barón, D., & Murgueitio, E. (2022). The sustainable transformation of the Colombian cattle sector: Assessing its circularity. *PLOS Climate*, 1(10), Article e0000074. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000074>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- The Circular Food Systems network (GRA-IRG). (s.f.). Global Research Alliance. <https://globalresearchalliance.org/research/integrative/networks/circular-food-systems-network/>
- Van Berkum, S., & Dengerink, J. (2019). Transition to sustainable food systems: The Dutch circular approach providing solutions to global challenges. Wageningen University & Research. <https://research.wur.nl/en/publications/transition-to-sustainable-food-systems-the-dutch-circular-approac>
- Van Selm, B., Frehner, A., De Boer, I. J. M., Van Hal, O., Hijbeek, R., & Van Ittersum, M. K. (2022). Circularity in animal production requires a change in the EAT-Lancet diet in Europe. *Nature Food*, 3, 66-73. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00425-3>
- Van Zanten, H. H. E., Van Ittersum, M. K., & De Boer, I. J. M. (2019). The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security*, 21, 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.06.003>
- Vergara, S. E., & Silver, W. L. (2019). Greenhouse gas emissions from windrow composting of organic wastes: Patterns and emissions factors. *Environmental Research Letters*, 14(12), Article 124027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB5262>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

LA NORMATIVIDAD QUE REGULA EL SECTOR LÁCTEO MEXICANO Y SU IMPACTO EN LA SOSTENIBILIDAD

Sergio Soltero Gardea¹

¹Confederación Nacional de Organizaciones Ganaderas.
Comisión Ejecutiva Bovinos Leche



En el caso particular de la leche y sus productos, la normalización en México, especialmente la de productos, ha tenido un tránsito difícil por los intereses económicos involucrados, complicándose aún más por la falta de integración de los eslabones de la cadena productiva, lo que impide que exista coincidencia en los objetivos del negocio

Antecedentes

La normalización es una tarea necesaria en todas las ramas de la actividad económica, pues de ella depende que dichas actividades se realicen de manera ordenada, y como consecuencia generar la satisfacción del consumidor intermedio o final. Sin embargo, a pesar de su importancia, es una actividad con frecuencia incomprendida, poco apoyada, y en algunas ocasiones con deficiencias en el conocimiento y tecnología necesarias, lo que obstaculiza la elaboración y actualización de las normas. Además, un factor importante en el proceso es la falta de interés de las partes interesadas, ya que en muchos casos no perciben a las normas como instrumentos de mejora, sino como requisitos adicionales que, eventualmente, generan costos adicionales.

Esto es particularmente cierto en el ámbito agroalimentario. En el caso particular de la leche y sus productos, la normalización en México, especialmente la de productos, ha tenido un tránsito difícil por los intereses económicos involucrados, complicándose aún más por la falta de integración de los eslabones de la cadena productiva, lo que impide que exista coincidencia en los objetivos del negocio.

A pesar de lo anterior, se ha hecho un esfuerzo significativo para elaborar disposiciones regulatorias que no se tenían y que eran necesarias, actualizar las que ya eran obsoletas y cancelar las que, por el tiempo y la falta de revisión, perdieron su razón de ser. En este quehacer, la academia y la investigación han jugado un papel

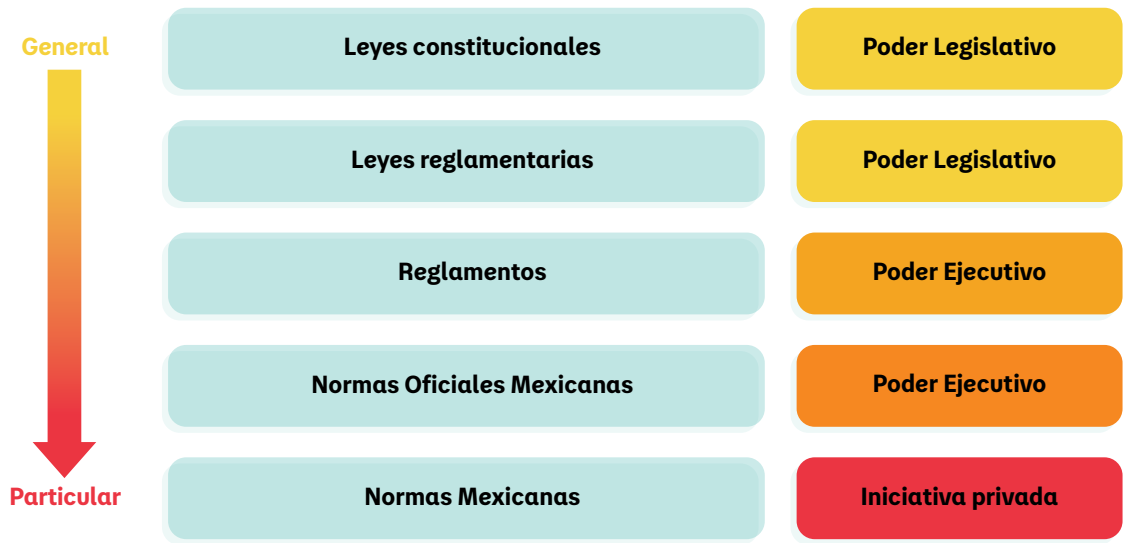
preponderante si se toma en cuenta que las normas tienen un carácter estrictamente técnico, por lo que su aportación ha sido muy importante. También, en este ejercicio, ha quedado clara la necesidad de la investigación orientada a resolver problemas en la evaluación de la leche y sus productos, especialmente en lo referente a métodos de prueba, en particular con el desarrollo de nuevos procesos y productos en respuesta a las demandas cambiantes de los consumidores.

Marco legal mexicano

Antes de iniciar con la descripción de la normatividad que regula al sector lácteo, es importante hacer referencia muy breve, puesto que no es el propósito de este capítulo, del marco legal que existe en el país en materia de regulación, ya que existe confusión en la mayoría de los integrantes del sector lechero, incluidos los consumidores, en cuanto a quién le corresponde realizar las leyes, los reglamentos, las normas y los estándares de calidad.

El marco legal mexicano se caracteriza por ir de lo general a lo particular, es decir se inicia con los derechos constitucionales de los mexicanos a la protección de la salud y a la alimentación, lo cual deriva en leyes constitucionales, leyes secundarias, reglamentos, Normas Oficiales Mexicanas (NOM) (cumplimiento obligatorio) y Normas Mexicanas (NMX) o estándares (cumplimiento voluntario), agregándose en cada uno de los niveles una mayor especificidad, de tal manera que exista suficiente claridad, para aquéllos a los que aplica, sobre el alcance de la regulación (figura 1).

Figura 1. Marco legal que aplica en la elaboración de las regulaciones en México



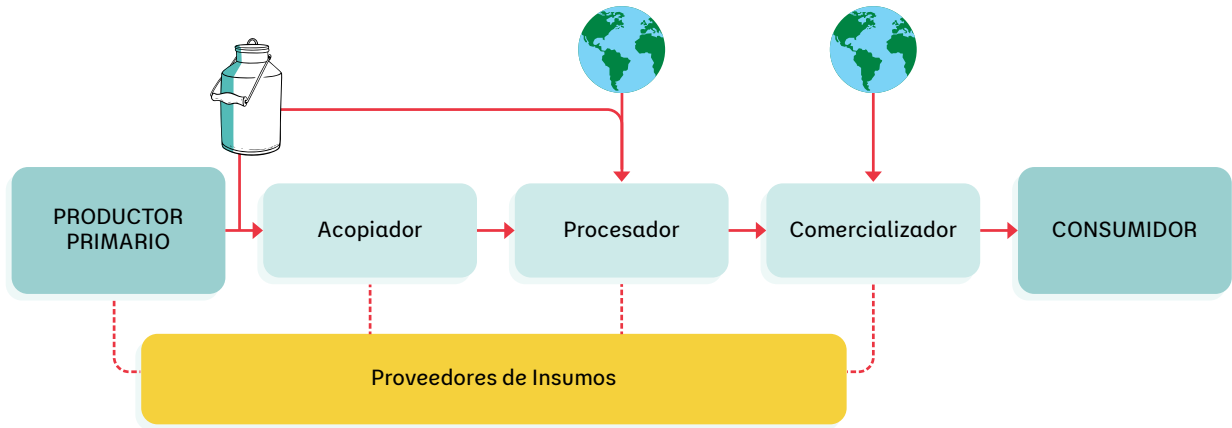
En el desarrollo de los instrumentos de regulación del sector lácteo participa el Poder Legislativo (leyes constitucionales, leyes secundarias y leyes reglamentarias), el Poder Ejecutivo (reglamentos y normas oficiales mexicanas) y la iniciativa privada (normas mexicanas o estándares).

La apertura comercial que se inició en México a finales de la década de 1980, con el ingreso del país al GATT, hoy Organización Mundial de Comercio (OMC), y consolidada a mediados de los años 90 con la firma del Tratado de Libre Comercio con América del Norte (TLCAN), ha sido el parteaguas en materia de legislación y normalización de los sectores económicos del país. El mercado exigía la elaboración y actualización de las leyes, se hizo una redistribución y delimitación de funciones y responsabilidades de las diferentes figuras del poder

ejecutivo, de tal manera que se eliminara la duplicidad o los vacíos en el desarrollo de las tareas. En lo que concierne al sector lácteo, se precisó el papel de las áreas de gobierno responsables de la producción y sanidad animal, de la salud pública, de la protección al consumidor y de la conservación del medio ambiente.

Gracias al esfuerzo antes señalado, en estos momentos en México, el sector lácteo cuenta con suficientes instrumentos para su regulación. De hecho, dentro del sector agroalimentario del país, es el más completo en materia de normalización y está acorde con las referencias normativas internacionales. En este espacio se describe, de manera resumida, la normatividad que aplica a los diferentes eslabones del sector lácteo (figura 2).

Figura 2. Eslabones que componen al sector lácteo de México



Disposiciones aplicables a la actividad lechera

En México, la actividad de normalización del sector lácteo es reciente si se toma en cuenta que la primera Norma Oficial Mexicana, una regulación sanitaria, fue la NOM-091-SSA1-1994, Esto no significa que, previo a esta fecha, la leche y sus productos no estuvieran regulados en el país, de hecho, el tema de la regulación de los lácteos en México había estado circunscrito al ámbito sanitario, ya que desde 1948 se habían desarrollado códigos, leyes y reglamentos, hasta llegar al instrumento vigente que es el Reglamento de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios de la Secretaría de Salud de 1988 y cuya última actualización fue en 2004.

Como se señaló anteriormente, el marco legal sanitario para los productos lácteos comenzó en 1948 con un reglamento para ordenar su comercialización. En 1988, el Reglamento de la Ley General de Salud incluyó requisitos sanitarios y especificaciones de composición para la leche y derivados. Este reglamento se usó por la industria hasta que, en 1997, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Norma Mexicana NMX-F-026-SCFI-1997, la cual establecía la denominación de la leche y la fórmula láctea, así como especificaciones fisicoquímicas e información comercial.

El sector lácteo mexicano, al igual que todos los sectores relacionados con la alimentación, está sujeto a ordenamientos oficiales tanto de tipo sanitario como comercial, con

los que se ejerce una regulación y control directo sobre los productos y procesos productivos; sin embargo, estos ordenamientos no son los únicos que deben considerarse, ya que existen otros ordenamientos que establecen requisitos en materia de seguridad e higiene de los trabajadores y conservación del medio ambiente. En la emisión de los ordenamientos participan, ejerciendo sus respectivas atribuciones, las dependencias a quienes corresponda la regulación o control del producto, servicio, método, proceso o instalación, actividad o materia a normalizarse.

Es función de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) fomentar la producción pecuaria y consecuentemente cuidar la prevención, control y erradicación de las plagas y enfermedades como la tuberculosis y brucelosis, que afectan a la ganadería en general y a la lechera en particular, tanto en su nivel de producción, como en la calidad de sus productos, así como coordinarse con la Secretaría de Salud (SSA) para promover las acciones de prevención y control de enfermedades transmisibles al hombre, como son los casos de la tuberculosis y la brucelosis. Para lograr lo anterior, cuenta con varias disposiciones legislativas, como la Ley de Desarrollo Rural Sustentable y la Ley Federal de Sanidad Animal y su Reglamento, así como un gran número de Normas Oficiales Mexicanas con especificaciones zoonosanitarias, siendo las más relevantes, en el caso de bovinos leche, las referidas en el cuadro 1. En estas tareas, la SADER se apoya en el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) para su vigilancia.

Cuadro 1. Normas Oficiales Mexicanas y otras disposiciones zoonosanitarias responsabilidad de SADER/SENASICA y su fecha de emisión

ORDENAMIENTO / FECHA DE EMISIÓN	OBJETIVO
NOM-001-SAG/GAN-2015 DOF 11-05-2015	Sistema Nacional de Identificación Animal para Bovinos y Colmenas.
NOM-012-SAG/ZOO-2020 DOF 15-06-2023	Especificaciones para la regulación de productos para uso o consumo animal.
NOM-041-ZOO-1995 DOF 20-08-1996	Campaña nacional contra la brucelosis en los animales.
Acuerdo sobre tuberculosis bovina DOF 30-12-2024	El acuerdo para la operación de la Campaña Nacional contra la Tuberculosis Bovina (<i>Mycobacterium bovis</i>).
Campaña contra el gusano barrenador del ganado	Campaña que lleva SENASICA contra el gusano barrenado del ganado (<i>Cochliomyia hominivorax</i>).

Además, la SADER/SENASICA cuenta con documentos de apoyo como el manual de buenas prácticas pecuarias en la producción lechera, publicado en 2019, así como con el manual de buenas prácticas pecuarias en la producción en sistemas de explotación extensivo y semiextensivo en ganado de doble propósito, publicado en 2014. Por otra parte, para elevar la producción y mejorar la calidad sanitaria de los productos de origen animal, es necesario establecer un control estricto en sanidad animal que permita a la ganadería nacional, especialmente la lechera, desarrollarse mejor y ser más eficiente. Las medidas zoonositarias, tienen por objeto prevenir, controlar y erradicar enfermedades y plagas de los animales, con la finalidad de proteger su salud y la de los consumidores.

Por otro lado, la Secretaría de Salud (SSA), tiene entre sus objetivos la inspección, vigilancia y fomento sanitario

que coadyuven al desarrollo de productos y servicios que no sean nocivos para la salud. En materia de legislación Sanitaria, la SSA cuenta con varios ordenamientos como la Ley General de Salud, cuya última reforma se llevó a cabo en junio de 2004, o el Reglamento de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios de 1988, teniendo en diciembre de 2004 su última modificación. En 2024, se aprobó la Ley General de Alimentación Adecuada y Sostenible, que busca, entre otras cosas, el fortalecimiento de la autosuficiencia, la soberanía y la seguridad alimentaria del país.

Además de los ordenamientos anteriormente señalados, la SSA ha publicado Normas Oficiales Mexicanas que establecen especificaciones sanitarias para productos, requisitos sanitarios para establecimientos y métodos de prueba para determinar el cumplimiento de éstas (cuadro 2).

Cuadro 2. Normas Oficiales Mexicanas de carácter sanitario que aplican al sector lácteo y su fecha de emisión en el DOF

ORDENAMIENTO / FECHA DE EMISIÓN	OBJETIVO
NOM-086-SSA1-1994 DOF 26-06-1996	Establece las especificaciones nutrimentales para alimentos y bebidas no alcohólicas con modificación en su composición.
NOM-130-SSA1-1995 DOF 14-10-1997	Establece las disposiciones y especificaciones sanitarias para alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico.
NOM-232-SSA1-2009 DOF 13-04-2010	Establece los requisitos, indicaciones y características para plaguicidas, a fin de minimizar los riesgos a la salud de los trabajadores y de la población en general.
NOM-243-SSA1-2010 DOF 27-09-2010	Establece las especificaciones sanitarias y nutrimentales que debe cumplir la leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y los derivados lácteos.
NOM-251-SSA1-2009 DOF 01-03-2010	Establece los requisitos mínimos de buenas prácticas de higiene en el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y sus materias primas.

La regulación sanitaria representa uno de los puntos más importantes de la salud pública, ya que pretende garantizar a la sociedad que los productos que usa y consume diariamente no representan ningún riesgo de daño a la salud. Por ello, la aplicación de prácticas de higiene y sanidad, a lo largo de la cadena, son indispensables para contribuir a mejorar la calidad de los productos que se ofrecen a la población consumidora, lo que se consigue al reducir los factores que influyen en la contaminación y en la alteración de éstos, además de asegurar su presencia y competitividad en los mercados nacionales e internacionales.

Por lo que toca a los ordenamientos de tipo comercial, éstos son regulados y vigilados por la Secretaría de Economía (SE) a través de la Ley de Infraestructura de la Calidad (LIC), que permite la emisión de normas con especificaciones de composición y nutrimentales (en coordinación con la SSA), denominación de productos y en requerimientos generales para su comercialización, así como el establecimiento de las bases en materia de normatividad por conducto de la Dirección General de Normas. Además, se tiene la Ley Federal de Protección al Consumidor, cuya responsabilidad de vigilancia de su cumplimiento recae en la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), la cual, además, vigila el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas aplicables a lácteos (cuadro 3).

Cuadro 3. Normas Oficiales Mexicanas que aplican a productos lácteos en México

PRODUCTO	ORDENAMIENTO/FECHA DE EMISIÓN	
Leche	NOM-155-SCFI-2012	DOF 03-05-2012
Yogur	NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018 DOF 31-01-2019	
Producto lácteo y producto lácteo combinado	NOM-183-SCFI-2012	DOF 03-05-2012
Mezcla de leche con grasa vegetal	NOM-190-SCFI-2012	DOF 03-05-2012
Crema	NOM-193-SCFI-2014	DOF 05-01-2015
Leche en polvo o leche deshidratada como materia prima	NOM-222-SCFI/SAGARPA-2018 DOF 31-10-2018	
Queso	NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018 DOF 31-01-2019	
Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Requisitos sanitarios	NOM-243-SSA1-2010	DOF 27-09-2010

Además, la SE cuenta con NOM que aplican a todos los productos, incluidos los lácteos, como la NOM-002-SCFI-2011 que establece las tolerancias y métodos de prueba para la verificación del contenido de alimentos preenvasados; la NOM-008-SE-2023 que establece el sistema general de unidades de medida; la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 que establece la información comercial y sanitaria que debe contener la etiqueta de alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasadas de fabricación nacional o extranjera.

En materia de medio ambiente, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es una dependencia del gobierno de México encargada de promover la protección, conservación y restauración del medio ambiente, así como el uso sostenible de los recursos naturales. Su misión es garantizar un entorno saludable para las generaciones presentes y futuras mediante la implementación de políticas y programas ambientales, para lo cual cuenta con diversas áreas, como la conservación de la biodiversidad, gestión de residuos, calidad del aire, recursos hídricos e impacto ambiental.

La legislación en la que se apoya es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la cual cuenta con varios reglamentos: Reglamento de ordenamiento ecológico; Registro de emisiones y transferencia de contaminantes; Prevención y control de la contaminación de la atmósfera; Evaluación del impacto ambiental; Auto-regulación y auditorías ambientales; Áreas naturales protegidas, y Residuos peligrosos. Asimismo, en 2014 se publicó en el DOF la Ley General de Cambio Climático, cuya

última modificación se realizó en abril de 2024, la cual establece disposiciones para hacer frente a los efectos adversos del cambio climático.

Además, cuenta con un gran número de Normas Oficiales Mexicanas; sin embargo, la que es relevante para las actividades relacionadas con la producción de leche es la NOM-001-SEMARNAT-2021, ya que esta norma establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales.

Los aspectos relativos a la seguridad e higiene de los trabajadores son regulados a través de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), la cual promueve condiciones de trabajo más seguras e higiénicas a través de la Ley Federal del Trabajo, una ley que fue elaborada en 1970 y cuya última reforma se efectuó el 24 de diciembre de 2024.

Normas Mexicanas que aplican al sector lácteo

Con la publicación, en 1992, de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, abrogada en 2020 por la Ley de Infraestructura de la Calidad, se abrió la posibilidad de que el sector privado coadyuvara con el sector público en la elaboración de normas o estándares de calidad, denominándose Normas Mexicanas (NMX), así como coadyuvar con la autoridad responsable en la evaluación de la conformidad, es decir, la determinación del cumplimiento de las normas.





A partir de 2002, la Dirección General de Normas del gobierno mexicano autorizó al Organismo Nacional de Normalización (ONN), del Consejo para el Fomento de la Calidad de la Leche y sus Derivados (COFOCALEC), para elaborar, modificar y cancelar Normas Mexicanas

en productos, procesos, servicios, equipos y métodos de prueba aplicables a la leche, excepto alimento para animales. Durante veintidós años de trabajo, el ONN de COFOCALEC elaboró 76 Normas Mexicanas, distribuidas en las cuatro áreas consideradas en su alcance (cuadro 4).

Cuadro 4. Normas Mexicanas elaboradas por el ONN de COFOCALEC que aplican al sector lácteo

TIPO DE NMX	NÚMERO
Equipo	8
Métodos de prueba	36
Procesos	3
Producto	29
TOTAL	76

La NMX-F-700-COFOCALEC-2012, que establece las especificaciones fisicoquímicas, sanitarias y métodos de prueba para leche de vaca, fue elaborada por primera vez en 2004, siendo un parteaguas en la gestión de la calidad de la leche cruda en las unidades de producción en el país, ya que antes de ésta sólo existían los requisitos establecidos por los compradores de leche, con métodos de prueba obsoletos y poco confiables.

Después de elaborar la norma de leche cruda, resultó evidente la necesidad de establecer los requisitos para la obtención, manejo y conservación de la leche en los establos, por lo que en respuesta de esta demanda se elaboraron, entre 2006 y 2012, las NMX relacionadas con equipos (cuadro 5).

Estas NMX fueron fundamentales para que las unidades de producción lechera tuvieran referencias, sobre las cuales trabajar, para la mejora de la calidad de la leche, particularmente en la solución de problemas relativos a la higiene y sanidad, ya que el incumplimiento de los requisitos generaba reducciones en el precio pagado por los compradores y, por ende, baja rentabilidad. Sin embargo, esto no fue suficiente, ya que fue necesario fortalecer los procesos, en los que el recurso humano está fuertemente involucrado. De acuerdo con esto, los grupos de trabajo de equipo y proceso unieron esfuerzos para desarrollar las NMX que se describen en el cuadro 6.

La NMX-F-730-COFOCALEC-2015 busca orientar a quienes administran u operan una unidad de producción lechera, sobre los requerimientos y las recomendaciones para asegurar el bienestar animal, la inocuidad, seguridad e idoneidad de la leche cruda, para los fines para los que está destinada. Incluye requisitos que aplican al personal que labora en un establo, a las instalaciones, el ganado, el equipo y el propio proceso. Esta norma, junto con la norma de leche cruda, son instrumentos indispensables que tanto productores como técnicos que atienden establos deben conocer y aplicar, ya que aporta elementos que permitirán mejorar la eficiencia en la producción de leche, independientemente de la dimensión del establo o del tamaño del hato.

Con relación a las 36 Normas Mexicanas de métodos de pruebas, todas son importantes pues permiten la evaluación de parámetros de la leche y sus productos, que definitivamente tienen un efecto favorable en el mejoramiento de los procesos, de la calidad de los productos y en la rentabilidad. Sin embargo, por su aporte en la etapa primaria del sector lácteo, vale la pena señalar que hay Normas Mexicanas que describen métodos de prueba para determinar la cuenta total bacteriana, la cuenta de células somáticas, de la acidez en leche, la presencia de residuos de antibióticos, de residuos de otras sustancias añadidas, así como el origen de la proteína, para evitar la adulteración de ésta.

Cuadro 5. NMX que aplican a equipo para la obtención, conservación y transporte de leche cruda

CLAVE DE LA NMX	TÍTULO
NMX-F-704-COFOCALEC-2019 (DOF 05-12-2019)	Sistema Producto Leche – Instalación de equipo de ordeño – Construcción y desempeño. (Cancela a la NMX-F-704-COFOCALEC-2012).
NMX-F-715-COFOCALEC-2014 (DOF 06-04-2015)	Sistema Producto Leche – Especificaciones para el enfriamiento y almacenamiento de leche cruda en las explotaciones lecheras. (Cancela a la NMX-F-715-COFOCALEC-2006).
NMX-F-720-COFOCALEC-2014 (DOF 06-04-2015)	Sistema Producto Leche – Especificaciones para el transporte de leche cruda, así como para el enfriamiento y almacenamiento de la misma en centros de acopio. (Cancela a la NMX-F-720-COFOCALEC-2006).
NMX-F-726-COFOCALEC-2016 (DOF 27-02-2018)	Sistema Producto Leche – Requerimientos para los servicios a equipos de ordeño y sistemas de enfriamiento en los centros de producción o explotación lechera. (Cancela a la NMX-F-726-COFOCALEC-2007).
NMX-F-740-COFOCALEC-2019 (DOF 25-10-2019)	Sistema Producto Leche - Instalación de equipo de ordeño - Pruebas mecánicas. (Cancela a la NMX-F-740-COFOCALEC-2012).
NMX-F-750-COFOCALEC-2016 (DOF 07-03-2018)	Sistema Producto Leche – Requerimientos de higiene para el diseño de maquinaria y equipo en contacto con la leche y productos lácteos.
NMX-F-773-COFOCALEC-2019 (DOF 05-07-2019)	Sistema Producto Leche - Instalación de equipo de ordeño - Vocabulario.
NMX-F-776-COFOCALEC-2019 (DOF 25-10-2019)	Sistema Producto Leche - Instalaciones automáticas de ordeño - Requisitos y pruebas.

Cuadro 6. NMX que establecen prácticas de higiene en el proceso de obtención, recolección y entrega de leche cruda

CLAVE DE LA NMX	TÍTULO
NMX-F-730-COFOCALEC-2015 (DOF 25-04-2017)	Sistema Producto Leche – Alimentos – Lácteos – Prácticas de higiene recomendadas para la obtención de leche. (Cancela a la NMX-F-730-COFOCALEC-2008).
NMX-F-762-COFOCALEC-2016 (DOF 09-03-2018)	Sistema Producto Leche – Guía de limpieza y desinfección de instalaciones, equipos y materiales usados en la producción y procesamiento de leche y productos lácteos.
NMX-F-770-COFOCALEC-2016 (DOF 09-03-2018)	Sistema Producto Leche – Alimento – Lácteo – Prácticas de higiene recomendadas para la recolección y entrega de leche.

Impacto en la sostenibilidad

La normatividad que aplica al sector lácteo ha contribuido a la sostenibilidad del sector, pues todas están orientadas a establecer requisitos que mejoran los procesos de producción, obtención, conservación, transporte, proceso, distribución y comercialización de la leche y sus productos.

Sin lugar a duda, es en el eslabón primario en donde se ha trabajado más, desde el punto de vista normativo, ya que es el segmento del sector lácteo con más oportunidades de mejora, que pueden hacer la diferencia entre ser un negocio que pueda trascender por generaciones, o desaparecer, como ha sido la suerte de muchas micro y pequeñas unidades de producción en las distintas regiones del país.

Referencias

Acuerdo para la operación de la Campaña Nacional contra la Tuberculosis Bovina (*Mycobacterium bovis*). Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

COFOCALEC. 2023. Informe de actividades de normalización del Sistema Producto Leche. 61 p.

Dispositivo Nacional de Emergencia de Sanidad Animal para prevenir diseminación del gusano barrenador del ganado. 2024. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Ley de Desarrollo Rural Sustentable. 2001. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Ley Federal de Sanidad Animal. 2007. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Ley Federal del Trabajo. 1970. <https://www.gob.mx/>

Ley de Infraestructura de la Calidad. 2020. Recuperado de <https://catalogonacional.gob.mx>

Ley General de Salud. 1984. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Ley General de Alimentación Adecuada y Sostenible. 2024. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Ley General de Cambio Climático. 2012. Recuperado de <https://www.gob.mx/>

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1988. Recuperado de <https://www.gob.mx/>

Manual de buenas prácticas en unidades de producción de leche bovina. 2019. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Manual de buenas prácticas en sistema de explotación extensivo y semi-extensivo de ganado bovino de doble propósito. 2014. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Norma Mexicana NMX-F-026-1997-SCFI. Leche - Denominación, especificaciones comerciales y métodos de prueba. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>.

Norma Mexicana NMX-F-700-COFOCALEC-2012. Sistema Producto Leche - Alimento - Lácteo - Leche cruda de vaca - Especificaciones fisicoquímicas, sanitarias y métodos de prueba. (Cancela a la NMX-F-700-COFOCALEC-2004).

Norma Mexicana NMX-F-704-COFOCALEC-2019 Sistema Producto Leche - Instalación de equipo de ordeño - Construcción y desempeño. (Cancela a la NMX-F-704-COFOCALEC-2012).

Norma Mexicana NMX-F-715-COFOCALEC-2014 Sistema Producto Leche - Especificaciones para el enfriamiento y almacenamiento de leche cruda en las explotaciones lecheras. (Cancela a la NMX-F-715-COFOCALEC-2006).

Norma Mexicana NMX-F-720-COFOCALEC-2014 Sistema Producto Leche - Especificaciones para el transporte de leche cruda, así como para el enfriamiento y almacenamiento de la misma en centros de acopio. (Cancela a la NMX-F-720-COFOCALEC-2006).

Norma Mexicana NMX-F-726-COFOCALEC-2016 Sistema Producto Leche - Requerimientos para los servicios a equipos de ordeño y sistemas de enfriamiento en los centros de producción o explotación lechera. (Cancela a la NMX-F-726-COFOCALEC-2007).

Norma Mexicana NMX-F-740-COFOCALEC-2019 Sistema Producto Leche - Instalación de equipo de ordeño - Pruebas mecánicas (Cancela a la NMX-F-740-COFOCALEC-2012)

Norma Mexicana NMX-F-750-COFOCALEC-2016 Sistema Producto Leche - Requerimientos de higiene para el diseño de maquinaria y equipo en contacto con la leche y productos lácteos.

Norma Mexicana NMX-F-773-COFOCALEC-2019 Sistema Producto Leche - Instalación de equipo de ordeño - Vocabulario.

Norma Mexicana NMX-F-776-COFOCALEC-2019 Sistema Producto Leche - Instalaciones automáticas de ordeño - Requisitos y pruebas.

Norma Mexicana NMX-F-730-COFOCALEC-2015 Sistema Producto Leche - Alimentos - Lácteos - Prácticas de higiene recomendadas para la obtención de leche. (Cancela a la NMX-F-730-COFOCALEC-2008).

Norma Mexicana NMX-F-762-COFOCALEC-2016 Sistema Producto Leche - Guía de limpieza y desinfección de instalaciones, equipos y materiales usados en la producción y procesamiento de leche y productos lácteos.

Norma Mexicana NMX-F-770-COFOCALEC-2016 Sistema Producto Leche - Alimento - Lácteo - Prácticas de higiene recomendadas para la recolección y entrega de leche.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SAG/GAN-2015. Sistema nacional de identificación animal para bovinos y colmenas. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-091-SSA1-1994. Bienes y servicios. Leche pasteurizada de vaca. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Recuperado de <https://salud.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-012-SAG/ZOO-2020. Especificaciones para la regulación de productos para uso y consumo animal. <https://www.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-041-ZOO-1995. Campaña Nacional contra la Brucelosis en los animales. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-086-SSA1-1994, Bienes y servicios. Alimentos y bebidas no alcohólicas con modificaciones en su composición. Especificaciones nutrimentales. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-130-SSA1-1995, Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Recuperado de <https://salud.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-232-SSA1-2009, Plaguicidas: que establece los requisitos del envase, embalaje y etiquetado de productos grado técnico y para uso agrícola, forestal, pecuario, jardinería, urbano, industrial y doméstico. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010, Productos y servicios. Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2012, Leche-Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

Norma Oficial Mexicana NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018, Yogurt-Denominación, especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas, información comercial y métodos de prueba (cancela a la NOM-181-SCFI-2010). Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-183-SCFI-2012, Producto lácteo y producto lácteo combinado-Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-190-SCFI-2012, Mezcla de leche con grasa vegetal-Denominaciones, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-193-SCFI-2014, Crema. Denominaciones, especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-222-SCFI/SAGARPA-2018, Leche en polvo o leche deshidratada-Materia prima-Especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018, Queso-Denominación, especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010, Productos y servicios.

Leche, fórmula láctea, producto lácteo combinado y derivados lácteos. Disposiciones y especificaciones sanitarias. Métodos de prueba. Recuperado de <https://dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCFI-2011, Productos preenvasados-Contenido neto-Tolerancias y métodos de verificación. Recuperado de <https://dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida. Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/>

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/>

Reglamento de la Ley General de Salud en materia de control sanitario de actividades, establecimientos, productos y servicios. 1988. Recuperado de <https://salud.gob.mx>.

Reglamento de la Ley Federal de Sanidad Animal. 2012. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Ordenamiento Ecológico. 2003. Recuperado de <https://www.gob.mx/>

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). 2004. Recuperado de <https://www.gob.mx/>

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera. 1988. Recuperado de <https://www.gob.mx/>

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. 2000. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Reglamento de la Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de autorregulación y auditorías ambientales. 2010. Recuperado de <https://www.gob.mx>

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Áreas Naturales Protegidas. 2000. Recuperado de <https://www.gob.mx>

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO APOYO A LA SOSTENIBILIDAD DE LAS LECHERÍAS

Aurelio Guevara Escobar¹
Mónica Cervantes Jiménez¹

¹Facultad de Ciencias Naturales,
Universidad Autónoma de Querétaro



La integración de la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT) y grandes bases de datos (Big Data) está permitiendo optimizar recursos y aumentar la eficiencia de la producción de leche y otros productos de origen animal

Introducción

En la narrativa posmoderna se propone avanzar hacia un modelo sostenible al reducir el consumo de carne o leche producidos por rumiantes y promover alternativas vegetales con menor huella ambiental. Sin embargo, los rumiantes y los microorganismos del rumen juegan un papel clave en la cadena de transformación, desde la energía solar hacia las plantas, hasta cuando los rumiantes convierten la biomasa vegetal en productos utilizables por nosotros. Este aspecto es clave, porque los mamíferos no tenemos las enzimas necesarias para aprovechar la energía de la fibra vegetal.

Mejorar la eficiencia de la producción animal es el principal enfoque para reducir su impacto sobre los recursos naturales, disminuir la huella de carbono, atender los retos de cambio climático y satisfacer una mayor demanda de alimentos. La integración de la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT) y grandes bases de datos (Big Data) está permitiendo optimizar recursos y aumentar la eficiencia de la producción de leche y otros productos de origen animal. El uso de todas estas tecnologías, incluida la robotización, permite el concepto de ganadería de precisión para animales en confinamiento o en libre pastoreo (Tedeschi et al., 2021). A mayor cantidad de datos y variables contenidas en la Big Data, es mejor la capacidad predictiva y disminuye la probabilidad de falsas alarmas.

La automatización y robotización en lecherías comenzó a desarrollarse en la segunda mitad del siglo XX, intro-

duciendo el sistema de ordeño automático (AMS) en 1992 por Lely. Ahora, algunos de los AMS cuentan con IA, como el Lely Astronaut, DairyRobot R9500 de GEA, Meadow Sense de DairyCS o las series DeLaval VMS. Los sistemas de IA también se aplican monitoreando en tiempo real la salud y nutrición del ganado, optimizando el uso del agua y la energía en procesos de riego, limpieza, ordeño y refrigeración, control ambiental y de alimentación, apoyando en la gestión de excretas y sobre todo proveen información para la toma de decisiones. La posibilidad de inmediatez en las decisiones es sobresaliente en muchos sistemas de ganadería de precisión. La tecnología asociada a la IA es promisorio para atender los problemas actuales, pero es importante conocer los componentes necesarios y cómo se integran. Estos aspectos se desarrollan en las siguientes secciones.

IoT y sensores

Durante milenios el humano ha observado al ganado y seleccionado animales según su temperamento, adecuados para fines productivos específicos y su adaptación al ambiente. Al comprender el comportamiento animal se han desarrollado prácticas sustentables de manejo, mejoramiento genético y bienestar animal. En el siglo XXI, la tarea de observación se facilita mediante sensores para registrar eventos o cambios en eventos. Así podemos caracterizar comportamientos y patrones de bienestar o enfermedad, a partir de datos productivos o descriptivos del estado y actividad animal (Kleen et al., 2023; Siachos et al., 2024; Vázquez-Diosdado et al., 2024).

Por otra parte, el IoT facilita la transferencia de datos en la red, almacenamiento, procesamiento computacional y la interpretación de la información por los usuarios (Tedeschi et al., 2021).

Existen sensores portátiles colocados directamente en el cuerpo de las vacas para monitorear su actividad, salud y bienestar en tiempo real (Zhang et al., 2024). Estos incluyen collares, aretes electrónicos, podómetros y bolos ruminales, los cuales pueden medir variables como el movimiento, la temperatura corporal o la rumia (cuadro 1). Las predicciones e identificación de situaciones requieren de conjuntar varios sensores y esto contribuye a disminuir falsas alarmas para casos de cojera o mastitis, por ejemplo (Siachos et al., 2024). Debido a que algunos sensores se implantan en el animal, existe preocupación bioética. Microsensores como el Nicla Sense ME (Bosh), identifica patrones de actividad y los relaciona con condiciones ambientales medidas por el mismo sensor. A diferencia de soluciones comerciales, este módulo es programable, resume grandes cantidades de datos y permite el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Por otro lado, sensores no portables recopilan información sin necesidad de estar adheridos al cuerpo del animal, utilizando tecnologías como cámaras con reconocimiento de objetos, sensores en equipos de ordeño, comederos inteligentes y estaciones de monitoreo ambiental (cuadro

2). Los sensores no portables se colocan en sitios estratégicos de corrales, salas de ordeño o pasillos. Estos sensores permiten analizar la producción y calidad de la leche, el consumo de alimento y agua, la condición corporal, la calidad del aire, las condiciones ambientales y el comportamiento de las vacas a través de la observación automatizada (Kleen et al., 2023; Menendez et al., 2023). El uso de sensores tiene aplicación en la operación del equipo en la lechería; usando dinámica computacional de fluidos, IA y sensores, se puede determinar el estado y la efectividad de la limpieza en tuberías en el AMS (Escrig et al., 2020; Chai et al., 2024).

Para lograr la optimización del consumo eléctrico con IA se necesita una combinación de sensores que capturen datos en tiempo real sobre consumo energético, condiciones ambientales, comportamiento del ganado y funcionamiento de aparatos. El objetivo es optimizar el consumo de electricidad en procesos clave como el ordeño automatizado, la refrigeración de la leche, la climatización de establos y la gestión de energías renovables (Wang et al., 2024). La IA predice cargas eléctricas y ajusta dinámicamente el uso de energía al sincronizar el funcionamiento de enfriadores, sistemas de ventilación con la producción de energía solar, evitando picos de consumo eléctrico innecesarios y detectando fallas en equipos antes de que generen desperdicio energético (Wang et al., 2025).

Cuadro 1. Características y aplicaciones de algunos sensores portátiles para vacas en la ganadería de precisión

Sensor portable	Tipo de Sensor	Aplicación	Fabricantes	Ubicación en el Animal
Collares Inteligentes	Acelerómetro, Giroscopio, Sensor de temperatura, micrófono	Detección de celo y parto, rumia, estrés térmico, actividad	SCR Heatime Pro (Allflex), Nedap CowControl, Moocall	Cuello
Aretes Electrónicos	Identificador de radiofrecuencia, Acelerómetro, Sensor de temperatura	Identificación, monitoreo de comportamiento y salud	Smartbow (Zoetis), Allflex EID	Oreja
Podómetros y Sensores de Patas	Acelerómetro, Sensor de presión	Detección de celo y parto, monitoreo de actividad y cojera	CowManager, Afimilk Pedometer	Patas
Bolos Ruminales	Sensor de temperatura, Sensor de pH	Monitoreo de temperatura interna, pH y salud metabólica	SmaXtec, DVM Systems	Rumen (ingestión)

Cuadro 2. Características y aplicaciones de algunos sensores no portables para vacas en la ganadería de precisión

Sensor No portable	Tipo de Sensor	Aplicación	Sistemas/ Fabricantes	Ubicación
Sensores de Visión Artificial (Cámaras y Video)	Cámara RGB, Cámara térmica, Inteligencia Artificial (IA)	Detección de cojera, celo, parto identificación individual, monitoreo de rumia y bienestar	Smartbow (Zoetis), CattleEye, Connecterra	Instalados en establos, corrales o áreas de ordeño
Sensores en Equipos de Ordeño	Conductividad eléctrica, Flujo de leche, Espectroscopia medición de progesterona en leche	Detección de mastitis, análisis de producción de leche y calidad	Lely Astronaut, DeLaval, BouMatic	Integrados en sistemas de ordeño automático
Sensores de Comederos y Bebederos	Sensor de peso, Sensor de flujo de agua, Identificador de radiofrecuencia	Monitoreo del consumo de alimento y agua, detección de cambios en la ingesta	DairyFeed (GEA), Smart Feeder (Allflex), RIC System, SmaXtec	Instalados en comederos y bebederos automáticos
Sensores Ambientales	Sensor de temperatura, Sensor de humedad, Sensor de gases (CO ₂ , NH ₃)	Control del clima en establos, detección de estrés térmico y calidad del aire	SmartBarn, Aranet4, CowManager	Instalados en el establo o en corrales
Sensores de identificación de radio frecuencia (RFID) en Puertas y Estaciones de Alimentación	RFID, Sensor de peso	Identificación del ganado, control de acceso a zonas de alimentación, pesaje automatizado	Allflex, Nedap Livestock Management	Puertas de acceso, estaciones de alimentación y balanzas
Sensores remotos orbitales y drones	Índices y atributos de la vegetación, temperatura, humedad del suelo, evaporación, lluvia, CH ₄ , CO ₂	Medición de variables ambientales y de la vegetación en series históricas y del territorio	NASA: MODIS, GPM, Landsat ESA: TROPOMI, Sentinel 5P	Suelo de praderas y pastizales y satélites orbitales
Sensores en el suelo y para el monitoreo del pastoreo	Sensor de humedad TDR, Sensor de temperatura, Espectroscopia NIR	Medición de cantidad y calidad del forraje, humedad del suelo, planificación del pastoreo	Campbell Sci, Pessl Instruments, John Deere Field Connec	Suelo de cultivos, praderas y pastizales
Sensores para Cercos Eléctricos Virtuales	GPS, Acelerómetro, Giroscopio, Radiofrecuencia	Delimitación de áreas de pastoreo sin cercas físicas, control del movimiento del ganado con alertas y estímulos	Nofence, Gallagher Virtual Fence, Vence	Collar con GPS en el ganado + sistema de geovallas en smartphone

Gracias a estas innovaciones, las granjas lecheras pueden reducir hasta un 40% su consumo de electricidad, aumentando su rentabilidad y sostenibilidad ambiental (Shah *et al.*, 2024).

Brindar datos sobre el conjunto de animales y su ambiente es la principal ventaja de los sensores no portables (Tedeschi *et al.*, 2021). El efecto microclimático de la temperatura y humedad relativa se han demostrado con algoritmos de IA sobre el rendimiento y calidad de la leche (Zanchi *et al.*, 2025). Para evaluar la condición corporal (BCS) existen dispositivos como la cámara de Laval BCS o CattleEye BCS, pero nuevos algoritmos de aprendizaje automático tienen muy buena precisión y exactitud (Li *et al.*, 2025). Las antenas de ultra banda ancha y aretes Sewio Leonardo iMU permiten localizar con errores de 0.15 m, posibilitando identificar comportamientos de juego, acicalamiento y alimentación de becerras en espacios reducidos (Vázquez-Diosdado *et al.*, 2024). Con micrófonos portables y no portables se han identificado mediante IA vocalizaciones asociadas a estrés o socialización, siendo otra forma de entender el comportamiento (Jung *et al.*, 2021).

Los “sensores remotos” a bordo de satélites orbitales y drones equipados con cámaras multispectrales permiten monitorear la cantidad y calidad del forraje, la humedad del suelo y variables ambientales necesarias para proyectar la producción de cultivos y pastizales (Guevara-Escobar *et al.*, 2023; Ali *et al.*, 2025; Qi *et al.*, 2025). Con una precisión de 4 m, la tecnología GPS tiene aplicación en collares o aretes electrónicos para rastrear la ubicación del ganado en pastoreo en tiempo real, facilitando la identificación de animales enfermos o extraviados; además, es la base para los sistemas de cerco eléctrico virtual, como eShepherd de Gallagher. Monitorear los cambios de peso corporal con una báscula SmartScale de C-lock sería un tercer elemento para una ganadería de precisión en pastoreo (Menéndez *et al.*, 2023). Los datos de sensores portables, no portables y los sensores remotos son complementarios, pues permiten evaluar el ambiente en diferentes escalas de tiempo y espacio.

Con páginas de internet, sitios en nube, un sistema de cómputo instalado en la lechería, e incluso en el *smartphone*, se puede acceder a un centro de control o “visor” donde se emiten alarmas y recomendaciones de manejo con base en el análisis de los datos (Kleen *et al.*, 2023). El visor es la interfaz entre nosotros y el IoT, al interconectar sensores y aparatos a través del internet recopilando y procesando datos de forma automatizada. El visor tiene la función de hacer accesibles y darles significado a los

datos, convirtiéndolos en información. Los mensajes en el visor pueden ser un listado de animales en riesgo de enfermedad o necesidad de atención. Es posible visualizar valores promedio y umbrales de desempeño, de manera que se puede evaluar en tiempo real la situación de la lechería señalando riesgos de fallo en el equipo, uso de energía, etcétera. Las alarmas pueden señalar condiciones de estrés en los animales con base en las medidas de temperatura corporal, ambiental, de los echaderos termorregulados, etcétera. Las gráficas de tendencia a través del tiempo de alarmas e indicadores pueden asociarse con cambios ambientales o en el manejo, permitiendo identificar situaciones y evaluar el impacto de cambios en la alimentación o prácticas de ordeño, ya sea en conjunto del rebaño o del desempeño de lotes de vacas específicas. Para sistemas como el eShepherd, el *smartphone* es el centro de control para administrar el pastoreo y ordenar el territorio.

Big Data

Las bases de datos adecuadas para hacer uso de la IA necesitan considerar distintos dominios de la vida animal (Lasser *et al.*, 2021). Estos dominios incluyen indicadores de: *la leche*, como la producción y calidad; *edad y crianza del animal*, que afecta su desempeño productivo y susceptibilidad a enfermedades; *etapa de lactancia*, crucial para evaluar riesgos de salud; y *valores genéticos*, que reflejan productividad potencial y la predisposición a ciertas condiciones. También se consideran *condiciones ambientales*, como temperatura y humedad importantes para el confort ambiental; *tipo de alojamiento*, que influye en el bienestar; y *nutrición/alimentación*, determinante para la salud metabólica. Además, datos de las *prácticas de manejo*, que impactan el estrés y la inmunidad; *historial de salud*, clave para la detección temprana de enfermedades; *datos reproductivos*, que influyen en la fertilidad y patologías asociadas; y finalmente, *indicadores de comportamiento y actividad*, que pueden revelar signos de enfermedad o malestar.

El Big Data se genera a partir de una gran cantidad de datos recopilados en tiempo real por aparatos como los AMS, sensores portables, no portables y remotos. Los datos históricos también se necesitan para mejorar la utilidad de la IA, pues permiten identificar patrones pasados sobre la idiosincrasia e historia de salud, así como sobre la reproducción y producción de cada vaca. Históricamente, son interesantes las relaciones que la IA puede identificar entre las coincidencias de patrones individuales de vacas

El concepto de ganadería de precisión implica el uso de tecnologías y robotización para hacer más eficiente el proceso productivo, que contribuye a disminuir la huella de carbono en aras de la sostenibilidad

y/o sus ancestros con cambios en el manejo y del personal, condiciones ambientales, entre muchos más (De Vries *et al.*, 2023). Al considerar datos de la vida pasada de la vaca y los sucesos de la vida inmediata, la IA puede identificar variables o condiciones importantes en los patrones; por ejemplo, del crecimiento o eventos de enfermedad, y entonces nosotros podremos enfatizar la obtención de datos para representar mejor ese dominio de la vida animal.

Independientemente del origen de los datos, ellos se pueden usar para sintetizar nuevas variables que reflejen algún dominio. El número de horas o días en los que la temperatura ambiental sobrepasa un umbral definido para un periodo es una variable que representa un posible estado de estrés. Esta variable podría asociarse con la producción de leche o el consumo de agua acumulado en ese periodo, el promedio o variabilidad en la temperatura corporal o los patrones de actividad del animal. Estas variables también son nuevas variables generadas a partir de la base de datos original y que enriquecen la Big Data de manera informativa. Así, para predecir el rendimiento de leche en la primera lactancia usamos variables sintéticas (primera y segunda derivada de la curva de crecimiento), de la fase de crecimiento de la becerria y seleccionar vaquillas de manera temprana (Guevara-Escobar *et al.*, 2024). Con la localización de GPS se puede derivar comportamientos como distancia caminada, distancia promedio y proximidad a vacas compañeras. Estas variables son útiles para explicar el comportamiento en pastoreo (Hendriks *et al.*, 2025). Este proceso de generación de nuevas variables se conoce como ingeniería de características (*feature engineering*), que es una parte esencial de la minería de datos, parte de la IA.

En la implementación del Big Data se enfrentan varios desafíos y limitaciones, como la conectividad en áreas rurales, donde el acceso a redes de alta velocidad puede ser

deficiente, dificultando la transmisión y análisis en la nube; pero la próxima red celular 6G resolverá estas limitaciones. El almacenamiento y procesamiento de enormes volúmenes de datos requiere infraestructuras robustas e incurre en costos elevados de equipo y energía. A la fecha no existe un estándar para las bases de datos que combinen datos provenientes de distintos sensores, ya que cada fabricante de sensores y software puede manejar formatos distintos, dificultando la compatibilidad y armonización entre sistemas. Finalmente, el análisis de datos e interpretación requiere herramientas avanzadas de IA y personal capacitado para extraer conclusiones útiles, lo que puede representar una barrera para productores con menos acceso a tecnología o entrenamiento en análisis de datos. A pesar de estos retos, el Big Data sigue transformando la producción lechera, permitiendo decisiones más precisas y una gestión optimizada del ganado.

Integración de datos

En los sistemas lecheros se genera gran cantidad de datos para apoyar a la eficiencia productiva. La integración de datos implica la combinación de información proveniente de sensores, sistemas de gestión, imágenes satelitales e incluso datos climáticos. Este enfoque multifuente permite identificar patrones que serían invisibles si se analizan de forma aislada. La integración de datos multifuente, de diferentes sensores o de la generación de variables sintéticas, mejora las predicciones de los algoritmos y la propia calidad de los datos (Cabrera y Fadul-Pacheco, 2021). Sin embargo, usar los datos de una forma eficiente es una tarea compleja porque las fuentes de los datos no se comunican unas con otras (por ejemplo, sensores portátiles de varias marcas), además de la gran heterogeneidad en formatos y resoluciones (Mhapsekar *et al.*, 2024).

La computación de borde o de niebla (Edge Computing o Fog Computing), es una estrategia para analizar la Big Data

proveniente de sensores portátiles, no portátiles o de otro tipo, más cerca del lugar donde se generan, por ejemplo, la granja. La computación de borde reduce el tráfico de datos y mejora la comunicación entre los dispositivos IoT y la nube de almacenamiento. Esta opción mejora la eficiencia en el sistema lechero, reduciendo los costos operacionales al proveer soluciones en tiempo real (Alonso *et al.*, 2019).

La desventaja es la capacidad técnica de los productores, la disponibilidad de capacidad de cómputo, la conexión a internet en zonas rurales, la privacidad y seguridad de los datos, pero sobre todo la disposición de los productores a cambiar de prácticas (Brewster *et al.*, 2017). Las plataformas que integran el análisis y visualización de datos multifuente son en su mayoría privadas, como DairyComp (<https://vas.com/es/>) y FarmWizard (<https://farmwizard.com/public/about.aspx>), las cuales integran variables de salud animal, reproducción y alimentación.

En este sentido, la generación de Big Data multifuente puede apoyar en la solución de problemas a gran escala, considerando modelos de circulación global. Sin embargo, muchos AMS tienen algoritmos y bases de datos propietarias (el usuario no tiene acceso a los datos originales y los algoritmos no se pueden revisar/modificar), lo cual dificulta, a nivel de lecherías, integrar otras bases de datos de monitoreo y control en tiempo real o históricas (Kleen *et al.*, 2023).

Los principios de datos FAIR proponen que la producción de datos y metadatos asociados, así como los flujos de trabajo que los rodean, debe ser encontrable, accesible, interoperable y reutilizable. Los principios FAIR tienen como objetivo abordar la falta de prácticas recomendadas ampliamente compartidas, claramente articuladas y de aplicación general en torno a la publicación de los datos generados (Da Silva Santos *et al.*, 2016). Sin embargo, cada unidad de producción tiene la facultad de decidir los protocolos de acceso, uso y compartición de los datos generados. Considerando que las políticas como Creative Commons (CC) son herramientas fundamentales para promover la colaboración, la transparencia y la reutilización de datos en diversos campos, incluyendo la investigación científica, la educación y la innovación tecnológica. Es por eso que las comunidades interesadas en reducir riesgos, mejorar las predicciones de modelos y las estrategias de adaptación ante el cambio climático y descarbonización en el sector lechero, podrían utilizar estas políticas para mejorar la compartición de datos con fines de fortalecer los análisis profundos.

En este sentido, los algoritmos de aprendizaje automatizado identifican patrones complejos y las desviaciones en los datos que representan el comportamiento y producción de la vaca respecto de su historia o la de sus compañeras y permiten asociarlos a condiciones de enfermedad, como acidosis-laminitis, metritis, mastitis o cuadros respiratorios (Lasser *et al.*, 2021; Kleen *et al.*, 2023), integrando datos multifuente para dar respuestas tempranas. La desventaja es que aún no se logra la interoperabilidad de datos climáticos, de sensores remotos, portables y no portables de los animales.

Finalmente, la estandarización de protocolos de comunicación y el desarrollo de plataformas de integración de datos abiertos, como DairyBrain (Cabrera y Pacheco, 2021), están facilitando la adopción de estas tecnologías. Además, la creciente disponibilidad de herramientas de análisis basadas en IA está democratizando el acceso a la ganadería de precisión.

Conclusión

La implementación de inteligencia artificial, sensores IoT y Big Data en la producción lechera ha permitido optimizar la eficiencia, mejorar el bienestar animal y reducir el impacto ambiental de la actividad ganadera. Estas tecnologías han revolucionado la recolección y análisis de datos, facilitando la toma de decisiones en tiempo real y permitiendo una gestión más precisa de los recursos. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la interoperabilidad de sistemas, la conectividad en zonas rurales y la estandarización de datos.

La integración de múltiples fuentes de información y el uso de algoritmos de aprendizaje automatizado ofrecen soluciones prometedoras para abordar estos retos, aunque requieren un marco de colaboración y acceso abierto a los datos para maximizar su potencial. Aumentar la eficiencia con la ganadería de precisión, impulsada por estos avances, representa una estrategia clave para disminuir la huella de carbono, enfrentar los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de alimentos, garantizando sostenibilidad y productividad en el sector lechero. La recolección masiva de datos requiere acuerdos claros de privacidad y control a favor de los agricultores, quienes a menudo carecen de poder sobre cómo se utilizan, comparten o comercializan sus datos productivos. Asimismo, persiste el debate sobre el uso ético de la inteligencia artificial y su potencial para acelerar, pero también reemplazar, la creatividad humana.

Referencias

- Alonso, R. S. et al. (2019). An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 98.
- Ali, A. y H. P. Kaul, (2025). Monitoring Yield and Quality of Forages and Grassland in the View of Precision Agriculture Applications—A Review. *Remote Sensing*, 17(2), 279.
- Cabrera, V. E. y L. Fadul-Pacheco (2021). Future of dairy farming from the Dairy Brain perspective: Data integration, analytics, and applications. *International Dairy Journal*, 121, 105069.
- Brewster, C., I. Roussaki, N. Kalatzis, K. Doolin y K. Ellis (2017). IoT in agriculture: Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE communications magazine*, 55(9), 26-33 pp.
- Chai, J. et al. (2024). Computational fluid dynamics (CFD) modeling and application for cleaning of food-contact surfaces: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14605.
- Da Silva Santos, L. B. et al. (2016). FAIR data points supporting big data interoperability. *Enterprise Interoperability in the Digitized and Networked Factory of the Future*. Londres: ISTE, 270-279 pp.
- De Vries, A., N. Bliznyuk y P. Pinedo (2023). Invited Review: Examples and opportunities for artificial intelligence (AI) in dairy farms. *Applied Animal Science*, 39(1), 14-22 pp.
- Escrig, J., E. Woolley, A. Simeone y N. J. Watson (2020). Monitoring the cleaning of food fouling in pipes using ultrasonic measurements and machine learning. *Food Control*, 116.
- Guevara-Escobar, A. et al. (2023). Estimation of forage mass in a mixed pasture by machine learning, pasture management and satellite meteorological data. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 14(1), 61-77 pp.
- Guevara-Escobar, A. et al. (2024). First Lactation Milk Yield Predicted by the Heifer's Growth Curve Derivatives. *Dairy*, 5(2), 239-248 pp.
- Hendriks, S. J., M. Qasim y J. P. Edwards (2025). Relationships between paddock-level pasture mass and cow data derived from GPS and behavior-monitoring on-animal sensors in rotationally grazed dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 108(2), 1644-1658 pp.
- Jung, D. H. et al. (2021). Deep learning-based cattle vocal classification model and real-time livestock monitoring system with noise filtering. *Animals*, 11(2), 357.
- Kleen, J. L. y R. Guatteo (2023). Precision livestock farming: What does it contain and what are the perspectives? *Animals*, 13(5), 779.
- Lasser, J. et al. (2021). Integrating diverse data sources to predict disease risk in dairy cattle—a machine learning approach. *Journal of Animal Science*, 99(11), 1-14 pp.
- Li, J. et al. (2025). Automatic body condition scoring system for dairy cows in group state based on improved YOLOv5 and video analysis. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 15(2), 350-362 pp.
- Mhapsekar, R. U., N. O'Shea, S. Davy, D. Kilbane y L. Abraham (2024). An Edge-Centric Industrial IoT Solution for Smart Dairy Processing. *IEEE Internet of Things Magazine*, 7(5), 80-87 pp.
- Menendez III, H. M., J. R. Brennan, K. A. Ehlert y I. L. Parsons (2023). Improving Dry Matter Intake Estimates Using Precision Body Weight on Cattle Grazed on Extensive Rangelands. *Animals*, 13(24), 3844.
- Qi, H., A. Chen, X. Yang y X. Xing (2025). Estimation of crude protein content in natural pasture grass using unmanned aerial vehicle hyperspectral data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, 109714.
- Shah, M. I. A., E. Barrett y K. Mason (2024). Reinforcement Learning Enabled Peer-to-Peer Energy Trading for Dairy Farms. En *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems* (27-38 pp.). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Siachos, N. et al. (2024). Automated dairy cattle lameness detection utilizing the power of artificial intelligence; current status quo and future research opportunities. *The Veterinary Journal*, 106091.
- Tedeschi, L. O., P. L. Greenwood y I. Halachmi (2021). Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming. *Journal of Animal Science*, 99(2), 1-11 pp.
- Vázquez-Diosdado, J. A. et al. (2024). Quantification of play behaviour in calves using automated ultra-wideband location data and its association with age, weaning and health status. *Scientific Reports*, 14(1), 8872.
- Wang, X. et al. (2024). AI-empowered methods for smart energy consumption: A review of load forecasting, anomaly detection and demand response. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(3), 963-993 pp.
- Wang, Q., Y. Li y R. Li (2025). Integrating artificial intelligence in energy transition: A comprehensive review. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101600.
- Zanchi, M. et al. (2025). Influence of microclimatic conditions on dairy production in an Automatic Milking System: Trends and Time-Series Mixer predictions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, 109730.
- Zhang, L. et al. (2024). Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. *Animal Research and One Health*, 2(1), 93-109 pp.

CASO MARGARITA DANONE

Sofía Díaz Rivera¹

¹Danone de México



Danone México implementó en México el Proyecto Margarita como una estrategia para proteger su cadena de valor de producción, y para empoderar a los productores de leche de escala familiar en los que confía, haciéndolos más competitivos y adaptados a sus mercados

Danone México

Danone es una compañía mundial líder en el mercado de alimentos y bebidas cuya misión es llevar la salud a través de la alimentación al mayor número de personas posible. Su visión está encapsulada en la frase “Danone, un planeta. una salud”, enfatizando la interconexión entre el bienestar humano y la salud de nuestro planeta. Danone opera de manera eficiente, sostenible y responsable, con el objetivo de crear valor tanto para los accionistas como para la sociedad.

Danone ha estado operando en México durante cincuenta años con marcas como Danone, Danonino, Activia, Danup, Bonafont, Silk, entre otras. México es uno de los diez principales mercados para Danone. Danone México cuenta con 34 plantas de producción, más de cien centros de distribución, más de quince mil empleados y más de 1.5 millones de puntos de venta. Danone México es de las primeras empresas transnacionales en obtener la Certificación B, lo cual significa que Danone busca un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente, integrando estos valores en su modelo de negocio.

Fiel al doble proyecto económico y social de Danone, el programa Margarita de México tiene como objetivo fortalecer la ganadería lechera en México, consolidando modelos de negocio y sistemas agrícolas resilientes.

El contexto: agricultura de pequeños productores

Los pequeños productores representan 49% de la producción de leche en México.

Enfrentan varios retos:

- Altos costos de transportación debido a bajo volumen y dispersión geográfica.
- Dificultad en establecer una cadena de frío que cumpla con los estándares de saneamiento y seguridad alimentaria debido a la falta de tanques de enfriamiento.
- Baja calidad de la leche, resultante de malas prácticas de producción y acceso limitado a alimento de calidad para el ganado lechero.
- Baja productividad y alta huella de carbono.

Adicional, México importa un tercio de la leche que consume. Dado este contexto, el Proyecto Margarita nació hace quince años para ayudar a desarrollar una ganadería lechera sostenible en México en los estados de Jalisco y Aguascalientes.

El Proyecto Margarita

Con el Proyecto Margarita, Danone México no sólo busca proteger su cadena de valor de producción, sino también empoderar a los productores de leche de escala familiar en los que confía, haciéndolos más competitivos y adaptados a sus mercados. ¿Cómo funciona? Los pequeños productores se unen a Margarita y reciben apoyo integral:

- Capacitación en buenas prácticas, cuidado animal, nutrición y emprendimiento.
- Asistencia técnica personalizada, un veterinario visita la granja al menos una vez por mes y da seguimiento vía remota.

- Acceso a financiamiento a una tasa de interés más baja que la del mercado, lo que permite mejorar la infraestructura de los establos y acceder a alimento de calidad.
- Logística de recolección de leche y comercialización directa a Danone, logrando estabilidad en el mercado.
- Tecnología – Sistema EPR para la granja “Madcap” o “Technoleche”.

El programa Margarita se logró gracias a la colaboración de todo un ecosistema: organizaciones de la sociedad civil, como Technoserve y Nuup; instituciones académicas como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); la Union Ganadera y Regional de Jalisco, así como varios financiadores como Danone Ecosystem, el Banco Interamericano de Desarrollo, FIRA, INAES, Sagarpa (hoy SADER), entre otros.

Acceso a financiamiento a pequeños productores

La exclusión financiera del sector agropecuario está muy

marcada, especialmente en unidades económicas de producción primaria. Esto impide que los productores pequeños puedan crecer o invertir para ser más resilientes al cambio climático. Por ello, hemos impulsado un mecanismo de acceso a financiamiento para Margarita, conocido como ROSCA.

Danone creó un fondo fiduciario con un millón de dólares en 2011 que proporciona garantías de crédito a los productores lecheros a través de un cuerpo de gobernanza multisectorial que incluye a Danone de México, TechnoServe y la UNAM. Los productores del proyecto Margarita que pasan una evaluación financiera pueden acceder a estas garantías. Incluso aquellos que no califican, se benefician de un mecanismo de retención de pagos. Las garantías ofrecen términos de préstamo favorables, con tasas de interés de TIIE +2%, mucho más bajas que en el mercado. Los términos de los préstamos varían de uno a cinco años. El programa Margarita también creó un mecanismo de cobro de créditos a través del pago de leche, asegurando bajas tasas de morosidad (sólo tres en más de catorce años).

Margarita apoya a pequeños productores de leche con asistencia técnica e infraestructura para que provean leche

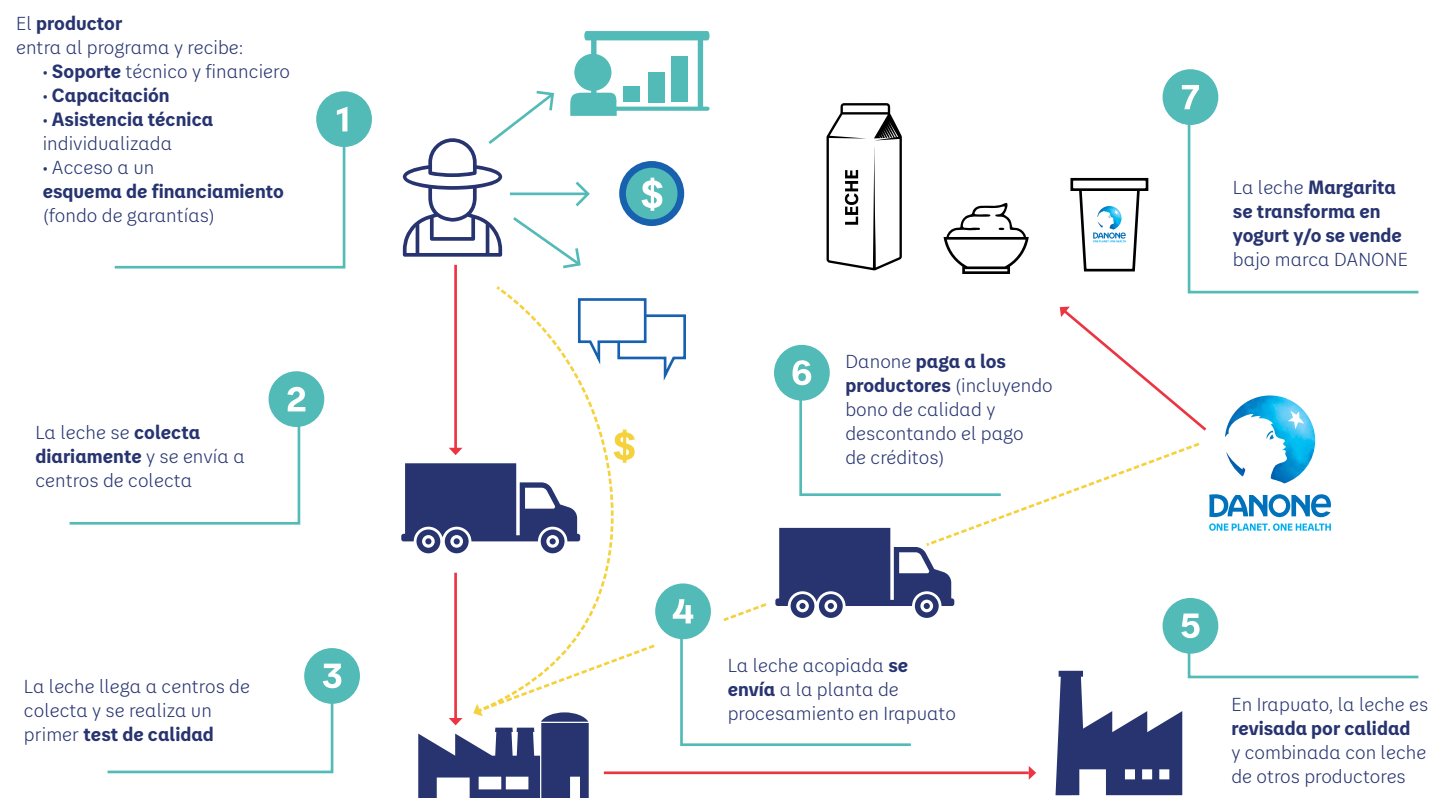


Ilustración 1: Modelo operativo de Margarita

Ejemplo del productor Jaime Cortés

Adicional a acceder a créditos a una tasa atractiva, ROSCA ayuda a los productores Margarita a crear un historial crediticio y reduce el riesgo para las instituciones financieras, además de gestionar alianzas con entidades gubernamentales y privadas. Al cierre de 2024, hemos logrado otorgar más de mil créditos ROSCA, con un monto

que asciende 234,000 MXP. A través de este mecanismo, los productores de Margarita han podido mejorar su infraestructura y equipo, y adquirir silo de maíz y otros forrajes, un elemento clave para mantener una producción de leche estable y de alta calidad y reducir la huella de carbono.

8 MM MXP alimento e infraestructura	2016	2022
Vacas	44	70
Productividad (L/vaca/día)	20	36
CO ₂ kg/L	2.19	0.90

Tecnología

El Proyecto Margarita ha implementado una herramienta digital llamada Madcap, diseñada para asistir a los ganaderos en varios aspectos clave. Esta herramienta permite el seguimiento y registro automático de la producción de leche, incluyendo parámetros de calidad, sin necesidad de intervención manual por parte del ganadero. Además, proporciona acceso a gráficas que muestran el desarrollo de la producción a lo largo del tiempo.

Los ganaderos también pueden visualizar sus pagos en línea con el desglose correspondiente, lo que reduce errores humanos y optimiza los tiempos de proceso. Madcap abarca todo el proceso de la leche para Margarita, desde la planificación de las rutas para la recolección, pasando por los análisis intermedios, hasta el pago de la leche. Gracias a esta herramienta se logró digitalizar el 100% del proceso. Se puede acceder a esta información desde el móvil o desde cualquier laptop.

Igual con la app de Technoleche desarrollada por la organización no gubernamental Nuup, el ganadero puede llevar la administración de su establo desde su celular. Los productores registran la actividad reproductiva de sus vacas y reciben alertas.

Agricultura regenerativa

La Ruta de Impacto es la estrategia de sustentabilidad de Danone que integra objetivos ambientales y sociales bajo el compromiso de desarrollar el negocio de manera sostenible y socialmente responsable. Estos objetivos están

estructurados en torno a tres pilares: salud a través de la alimentación e hidratación, preservación y regeneración de la naturaleza y desarrollar personas y comunidades prosperas. Con este planteamiento, Grupo DANONE México reafirma su compromiso con la misión de llevar salud a través de los alimentos y la hidratación a tantas personas como sea posible, a la vez de generar un impacto positivo en las comunidades donde opera, en colaboración estrecha con un ecosistema de aliados estratégicos.

En Danone, la agricultura ocupa una posición central en su misión de llevar salud a través de la alimentación al mayor número de personas posible. Sin embargo, el panorama agrícola enfrenta desafíos significativos incluyendo el cambio climático, la escasez de agua, la disminución de la biodiversidad y el desarrollo económico. Danone reconoce que los sistemas alimentarios son responsables de aproximadamente un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, sin vacas, no hay leche ni yogur.

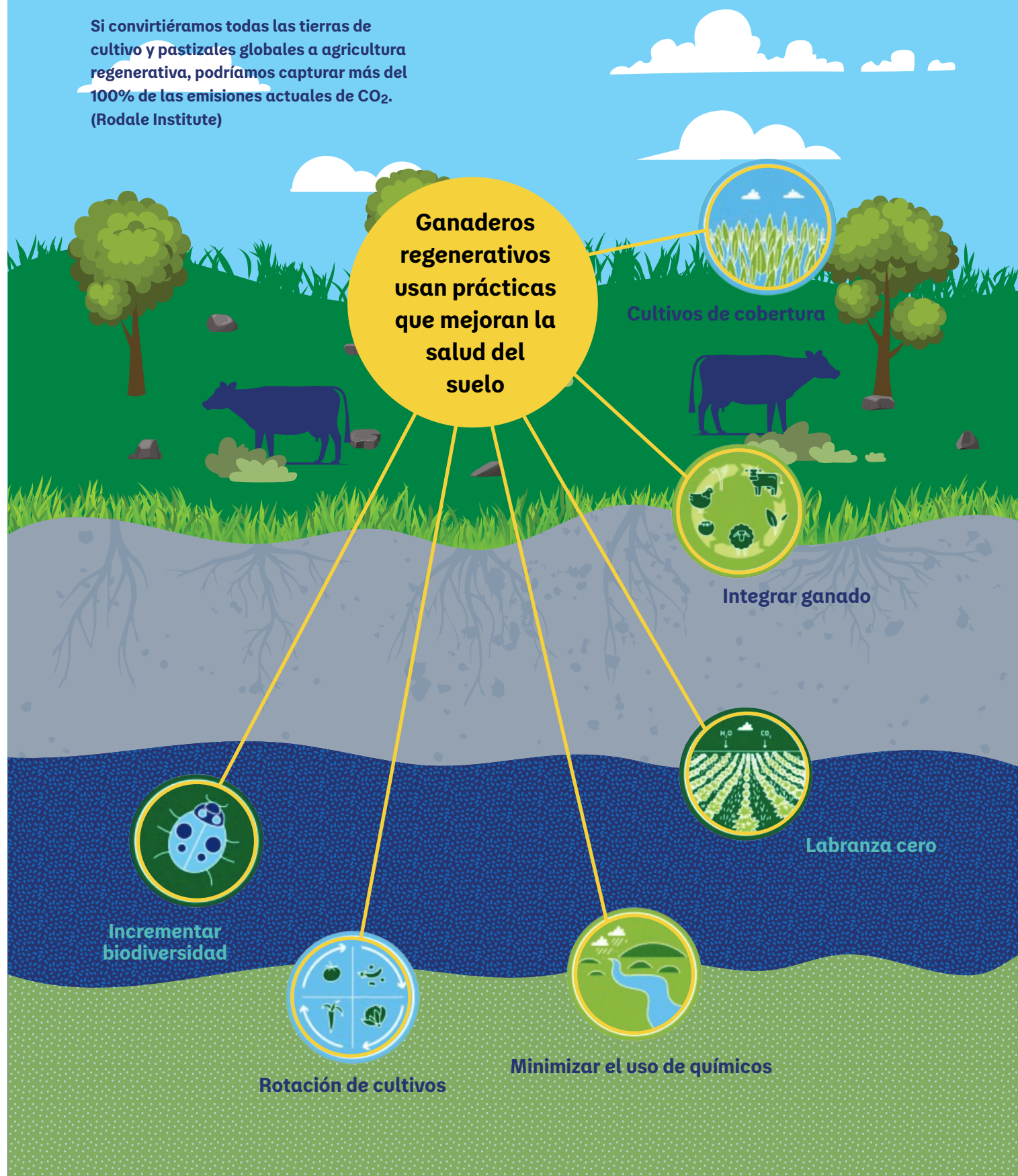
Danone está comprometido con la descarbonización de su cadena de suministro en línea con la iniciativa de objetivos basados en la ciencia (STBTi) de 1.5 °C, lo que equivale a una reducción de alrededor de 40% de emisiones de CO₂ al 2030 y la transición hacia la agricultura regenerativa. Además, está comprometido a reducir en un 30% las emisiones de metano provenientes de la leche fresca para 2030. Danone busca fomentar la agricultura regenerativa a partir de tres principios: cuidado del suelo, agua y biodiversidad, apoyo a productores locales y bienestar animal.





Explicación de Agricultura Regenerativa

Si convirtiéramos todas las tierras de cultivo y pastizales globales a agricultura regenerativa, podríamos capturar más del 100% de las emisiones actuales de CO₂.
(Rodale Institute)



6 Principios de la Agricultura Regenerativa



Danone México tiene una relación cercana todos sus ganaderos. Están trabajando de la mano con ellos para reducir las emisiones de CO₂ y metano, y hacerlos más resilientes frente al cambio climático.

En 2022 se inició un piloto con 41 productores Margarita para transformar sus granjas hacia la agricultura regenerativa. Se implementaron prácticas como el pastoreo rotacional de Voisin y la reducción de fertilizantes en parcelas de maíz. Adicionalmente, se puso atención a la nutrición de las vacas, a la reforestación en los potreros y a la gestión racional del agua. El pastoreo y las buenas prácticas de nutrición permitieron a los productores reducir los costos de alimentación en 5% e incrementar los litros por vaca al día en 4.79 litros. Se logró reducir el uso de fertilizantes en 45% e incrementar la productividad en las parcelas de maíz en 3%.

Para reducir el metano, Danone ha trabajado con los ganaderos para manejar correctamente el estiércol. Una solución es el uso de biodigestores. Se cerrará 2025 con al menos veinte biodigestores instalados en unidades de productores Margarita. Se ha estimado que cada biodigestor reduce cincuenta toneladas de metano al año.

Todo el trabajo realizado en Margarita desde la mejora de la productividad, la mejora de la calidad de la leche, el uso de biodigestores e introducción de prácticas de agricultura regenerativa, ha permitido disminuir la huella de carbono de la leche en un 31% desde 2020. Hoy en día, la leche de Margarita tiene un factor de emisión de 1.86 kg de CO₂e por litro de leche, que es menor de lo que se ha señalado en México de 2.1 kg de CO₂e por litro de leche.

Estamos buscando escalar las prácticas de agricultura regenerativa, para que los productores Margarita sean más resilientes al cambio climático, especialmente cambiando de un sistema de alimentación intensiva basado en maíz a un modelo de agricultura regenerativa. Por lo que en

los próximos cinco años estaremos implementando las siguientes estrategias:

- Mejora del suelo en 1,000 hectáreas mediante la reducción de la labranza, fertilización personalizada y cultivos intercalados para mejorar la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes.
- Optimización de la producción de pasto, aumentando el rendimiento del pasto en un 30% y reduciendo los costos de alimentación en un 5%-10% mediante el pastoreo rotacional y la mejora del pasto en quinientas hectáreas, asegurando un suministro de alimento consistente y resiliente para el ganado lechero.
- Reverdecimiento de las granjas, plantando hasta 30,000 árboles nativos, arbustos y cactus para mejorar la biodiversidad, apoyar la infiltración de agua y mejorar el carbono orgánico del suelo, contribuyendo a un ecosistema agrícola sostenible.
- Servicios y apoyo a las granjas, proporcionando acceso a nueva maquinaria agrícola para prácticas regenerativas, estableciendo un centro de compra de forraje centralizado y ofreciendo incentivos directos a los agricultores, como subsidios, préstamos asequibles y esquemas basados en primas para fomentar prácticas sostenibles

Principales resultados Margarita

A quince años de Margarita hemos logrado que los productores Margarita incrementen su productividad 56%, de 16 L/vaca/día a 25 L/vaca/día. El hato duplicó de veinte vacas en promedio por productor, a cuarenta. Al igual el ingreso incrementó casi tres veces de acuerdo con un estudio de impacto realizado por Technoserve en 2020. Margarita representa hoy 35% de la leche que usa Danone México. Más de 1,000 productores de escala familiar se han beneficiado de Margarita a lo largo de los quince años del programa.

**conclusiones y
recomendaciones**

Se destaca la importancia de la sostenibilidad en la cadena láctea frente al cambio climático, destacando el impacto histórico de las actividades humanas en el medio ambiente, especialmente desde la Revolución Industrial, que han alterado el equilibrio ambiental. Para ello se consultaron datos históricos, científicos y técnicos, con referencias a estudios internacionales, como los del grupo de expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), de las Naciones Unidas, y la Federación Internacional de Lechería (IDF). Se presentan conceptos clave como el ciclo biológico del carbono, los gases de efecto invernadero (GEI): metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y dióxido de carbono (CO_2), y su relación con la agricultura y ganadería, y se examinan aplicaciones prácticas, como el uso de estiércol para mejorar suelos o la implementación de tecnologías como reactores anaeróbicos, adaptadas a diferentes escalas de producción. Se deja claro que las soluciones deben adaptarse a contextos locales, considerando diferencias en clima, escala de producción y recursos disponibles, y que la sostenibilidad en la cadena láctea no sólo depende de tecnología, sino también de un cambio en prácticas y valores, como el manejo responsable del agua y el bienestar animal constituyendo un desafío colectivo que demanda acción inmediata y coordinada de todos los actores que participan.

La leche es un bien ampliamente necesario y apreciado por las sociedades del mundo, por la calidad de sus componentes en la nutrición humana y lo que representan en cuanto a beneficios para la salud, su contribución al desarrollo infantil pleno, la salud ósea y la prevención de enfermedades como la osteoporosis. Se discuten las posturas en contra del consumo de leche por personas adultas; en particular, se destaca la ausencia de evidencia concluyente que vincule el consumo de lácteos enteros con enfermedades cardiovasculares; de ahí, se recomienda incluir lácteos en la dieta de todas las edades, adaptándose a necesidades individuales e investigar más sobre los efectos de los lácteos en poblaciones con intolerancias o alergias. En cuanto a la leche como materia prima para diferentes procesos industriales, se reconoce la necesidad de optimizar los mismos para que el aprovechamiento de los subproductos lácteos se haga de manera más sostenible.

El documento ofrece un análisis de la industria lechera en México, los actores que participan y la caracterización de los diferentes sistemas de producción, su evolución, ubicación, impacto socioeconómico y contribución al sector agropecuario, basado en datos oficiales, padrones ganaderos y estudios empíricos, para analizar la distribución geográfica, tenencia de la tierra, prácticas tecnológicas y acceso a recursos tecnológicos, productividad y canales de comercialización. Se detallan las disparidades en acceso a tierras de riego y temporal entre pequeños y grandes productores. La concentración de la producción en grandes hatos (44% de la leche proviene de unidades con más de 500 vacas) contrasta con la marginalización de

pequeños productores, lo que mantiene en México una estructura lechera polarizada, con sistemas especializados altamente eficientes y sistemas tradicionales de baja productividad; 77% del inventario de vacas está en manos del sector privado, con grandes empresas dominando la producción y comercialización. Por otro lado, la lechería de doble propósito, aunque marginal en el mercado formal, es vital para comunidades rurales y zonas marginadas, particularmente en el trópico mexicano. La producción nacional ha sido tradicionalmente insuficiente para satisfacer el consumo nacional; casi un tercio se cubre con importaciones, principalmente de Estados Unidos, lo que refleja vulnerabilidad en autosuficiencia.

El sector lácteo de México requiere de la aplicación de estrategias específicas para cada sistema, desde financiamiento hasta capacitación, para reducir brechas y mejorar sostenibilidad; se subraya la urgencia de integrar a los pequeños productores en cadenas de valor más justas y tecnificar procesos sin perder de vista el contexto socioeconómico diverso de México.

En cuanto a los procesos industriales, en el libro se exploran las motivaciones que impulsan a las empresas a adoptar prácticas sostenibles, como presiones regulatorias, demandas de consumidores y beneficios competitivos. El objetivo principal es concienciar sobre la necesidad de reducir emisiones de GEI y promover estrategias para lograr una industria láctea más sostenible. El documento utiliza un enfoque práctico y teórico, combinando datos globales con ejemplos específicos de empresas líderes transnacionales en México, como Danone y Nestlé. Se analizan las emisiones de GEI (alcances 1, 2 y 3) y se presentan herramientas y metodologías para medir y reducir la huella de carbono.

La industria láctea contribuye con 2.7% de las emisiones globales de GEI y las empresas son motivadas por regulaciones, consumidores, inversionistas y responsabilidad social. La educación y capacitación en sostenibilidad son fundamentales para el compromiso interno y externo y el éxito depende de la colaboración multisectorial y la adopción de tecnologías limpias. Como señala Antoine Riboud, “Los recursos de energía de la tierra pueden ser limitados, pero los recursos de la humanidad no”, subrayando la responsabilidad colectiva hacia un futuro sostenible.

Como marco de referencia, el documento ofrece en forma resumida información sobre las emisiones de GEI generadas por actividades económicas en México. Su objetivo principal es analizar el Inventario Nacional de Emisiones de GEI (INEGYCEI), integrado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), para identificar fuentes, tendencias y acciones prioritarias en cumplimiento del Acuerdo de París (2015). Las emisiones totales en México crecieron a una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 1.44% (1990-2021), alcanzando 714.04 millones de ton/año de CO_2e en 2021; de éstas, el sector

agropecuario y los cambios de uso del suelo (AFOLU), representaron 19% y la ganadería bovina contribuye con 76.7% de las emisiones de AFOLU (62.2% por fermentación entérica y 14.5% por manejo de estiércol), con una TMCA de 0.56%, que es alrededor de la cuarta parte de la TMCA de la producción del sector de bovinos. La producción de leche representa aproximadamente 15% de las emisiones del sector bovino.

En cuanto al agro mexicano, las áreas forestales capturan entre 145% y 205% de las emisiones de AFOLU, destacando su papel clave en la neutralidad climática. Sin embargo, la captura en más de 110 millones de hectáreas de áreas de apacentamiento no es cuantificada y esto representa una importante tarea pendiente para contar con información más precisa. Resulta entonces muy importante fortalecer la colaboración interinstitucional y adoptar tecnologías para monitorear con mayor precisión emisiones y captura de GEI, priorizando sectores críticos como la ganadería y la silvicultura, en línea con los compromisos internacionales de México en la materia.

En lo relativo a las herramientas disponibles para la medición de la huella de carbono en el sector, se ofrece una revisión de los métodos tradicionales (cámaras respiratorias, gas trazador SF_6) y nuevas tecnologías (sensores láser, sistemas Sniffer, imagenología hiperespectral), comparando su costo, precisión y viabilidad en distintos contextos productivos. Se reconoce que la medición precisa de metano (CH_4) es esencial para reducir la huella de carbono de la producción láctea y que no hay un método único ideal; la elección depende de recursos, escala y objetivos (ej. investigación vs. campo). Tecnologías como sensores láser o nanotecnología ofrecen monitoreo, no invasivo, en tiempo real y sistemas como Sniffer demuestran que soluciones de bajo costo pueden ser efectivas en contextos diversos.

En el libro se presenta información que relaciona el bienestar animal (BA) con la sostenibilidad de la producción lechera. Para ello, se emplea un enfoque científico basado en indicadores biológicos (fisiológicos y conductuales) para evaluar el BA, utilizando modelos como los “cinco dominios” (nutrición, ambiente, salud, interacciones conductuales y estado mental). También se analizan protocolos de certificación europeos (Welfare Quality® y AWIN®) y estudios de caso en ganado lechero. El bienestar animal es fundamental para una producción lechera sostenible, ética y eficiente; problemas como cojeras, mastitis y estrés social reducen productividad; soluciones prácticas incluyen mejor manejo e instalaciones. Se discute, para sistemas pastoriles el recurso de los sistemas agroforestales, que combinan beneficios ambientales y de bienestar animal, siendo una alternativa viable a los monocultivos. Se concluye que es esencial educar a productores y consumidores sobre la importancia del bienestar animal y su impacto en la sostenibilidad global de los sistemas de producción de leche.

Uno de los enfoques para mejorar la sostenibilidad de los sistemas lecheros es el mejoramiento genético de las vacas. El mejoramiento genético como estrategia para reducir las emisiones de CH_4 en el ganado lechero es un tema crucial ante la contribución del sector ganadero al 35-40% de las emisiones antropogénicas de este gas. El objetivo principal es explorar cómo la selección genética puede disminuir estas emisiones sin comprometer la productividad, aprovechando la variabilidad genética existente en los animales. El tema se analiza con un enfoque multidisciplinario que integra genética, microbiología ruminal y tecnologías genómicas. Se analizan métodos de selección directa (medición de CH_4) e indirecta (rasgos correlacionados como eficiencia alimenticia o perfil de ácidos grasos en la leche), así como herramientas avanzadas como la edición genética (CRISPR-Cas9) y ciencias “ómicas”. Existe suficiente variabilidad genética en el ganado lechero para seleccionar animales con menores emisiones de CH_4 ; la selección genómica y la edición genética son prometedoras, pero requieren más desarrollo y validación y lo más recomendable es combinar mejoramiento genético con manejo nutricional y microbiología ruminal y superar limitaciones técnicas, económicas y regulatorias. Aunque persisten retos, el mejoramiento genético es una estrategia viable y duradera para mitigar el impacto ambiental de la ganadería.

Otro aspecto primordial de la producción lechera es la salud animal y su relación con la sostenibilidad de los sistemas. El presente documento utiliza un enfoque multidimensional, integrando estudios científicos, datos económicos y casos prácticos para analizar enfermedades bovinas, su impacto en la productividad y estrategias de mitigación de GEI. Se destacan investigaciones recientes y experiencias de campo. Ejemplos como la cetosis y la mastitis muestran pérdidas económicas y aumento de emisiones de GEI y prácticas como prevención de enfermedades y reducción de estrés mejoran la sostenibilidad ética y económica, pero su adopción generalizada, sostenible, requiere apoyo financiero y educativo, especialmente para pequeños productores.

Difícilmente se puede hablar de prácticas de sanidad animal sin tocar el tema de medidas de bioseguridad. Por ello, en este documento se dio un lugar especial a este tema que aborda la importancia de la misma en las unidades de producción lechera como estrategia clave para proteger la salud animal, humana y ambiental bajo el enfoque de Una Sola Salud (USS). Para su análisis, se utilizó un enfoque multidisciplinario, integrando datos de organizaciones como la OMSA, FAO y estudios científicos. El análisis se centró en fuentes de contaminación (animales, personas, equipos, ambiente); vías de transmisión (contacto directo, aerosoles, ingestión, fómites, vectores, transmisión sexual) y niveles de acción (bioexclusión, biocontención, biogestión). La bioseguridad debe ser proactiva e incluye capacitar a productores en protocolos de bioseguridad,

fortalecer políticas públicas alineadas con USS e invertir en investigación para enfrentar desafíos emergentes.

En un capítulo del libro, se discute cómo las instalaciones y equipos utilizados en la producción lechera intensiva contribuyen a la emisión de GEI, destacando el CH_4 y N_2O como principales gases. Su objetivo es describir la interacción entre el manejo del ganado, las construcciones lecheras y la tecnología utilizada, proponiendo estrategias para mitigar estas emisiones. Se abordan aspectos como la orientación de las construcciones, los materiales de los pisos, el uso de biodigestores, paneles solares y sistemas de recuperación de calor y de mitigación de estrés calórico en los animales, todo en función de adoptar prácticas sostenibles y estandarizar métricas para cuantificar emisiones de GEI en el sector.

Un aspecto fundamental, asociado con la emisión de GEI en las unidades de producción lechera es el referente a los alimentos ofrecidos al ganado y, en la actualidad, el uso de aditivos en la alimentación de las vacas para reducir las emisiones de metano. La alimentación del ganado lechero influye en la emisión de GEI, especialmente metano y óxido nítrico, y existen estrategias nutricionales prácticas para reducir estas emisiones sin afectar la productividad, bajo el principio de las “3 S”, es decir, la producción “Segura, Suficiente y Sostenible”, basadas en evidencia científica para el mejoramiento de dietas, el uso racional de aditivos y la optimización del manejo y oferta de los alimentos a los animales. Forrajes jóvenes y digestibles pueden reducir las emisiones de metano en 15%; un efecto similar se puede inducir con la adición de aceites vegetales en las dietas, en las que el adecuado balance de proteínas es crítico para reducir las emisiones de óxido nítrico. Se concluye que las dietas de precisión con forrajes más digestibles y adecuado balance energético-proteico son la base para reducir la emisión de GEI y evitar el exceso de proteína en las dietas para reducir la emisión de óxido nítrico, sin afectar la producción de leche.

En cuanto al uso de aditivos y suplementos para reducir las emisiones de metano, se ofrece información basada en estudios científicos y metaanálisis. Se destacan tres principales mecanismos de acción de estos productos: redirección del hidrógeno (ej. nitratos); modificación de la fermentación ruminal (ej. taninos, saponinas, aceites esenciales) e inhibición directa de arqueas metanogénicas (3-nitrooxipropanol, algas *Asparagopsis*). El metano ruminal representa una pérdida del 2-12% de la energía consumida por el bovino y la metanogénesis depende de la capacidad reductora del rumen, los microorganismos ruminales y los patrones de fermentación. Para el caso de México, sólo la monensina y el 3-nitrooxipropanol (3-NOP) están disponibles comercialmente. El 3-NOP y las algas *Asparagopsis* muestran alta eficacia (>25% reducción de CH_4), pero para el uso de estas últimas, se requieren más estudios de inocuidad. Las alternativas naturales, como taninos

y aceites esenciales son viables en pequeña escala, aunque con efectos variables en la digestibilidad de los alimentos. La promoción del uso generalizado de muchos de estos productos depende de los sistemas de producción, costos y el uso de incentivos (ej. certificados de carbono) para impulsar una ganadería sostenible. El tema de aditivos requiere de mantener investigación permanente para el desarrollo de opciones económicas, seguras y adaptadas a las diferentes condiciones de producción en México.

Complementando el tema de la alimentación y uso de aditivos para reducir las emisiones de GEI en el sector lechero, se incluyó un capítulo sobre producción y conservación de forrajes, como base de la alimentación de las vacas. Se aborda la producción de forraje de maíz como estrategia para mejorar la productividad lechera y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Se revisan las prácticas óptimas en la selección de semillas y el momento de cosecha para maximizar el rendimiento y la calidad nutricional del forraje, para contribuir a la sustentabilidad y neutralidad de carbono en la producción de leche, con base en los resultados de estudios realizados a lo largo de diez años en la región Altos de Jalisco, México, evaluando diferentes híbridos de maíz y etapas de madurez a la cosecha, en condiciones de riego y de temporal. Se utilizaron datos experimentales para comparar rendimientos, composición nutricional y digestibilidad del forraje. Entre las conclusiones se destacan las recomendaciones de elegir híbridos de maíz evaluados localmente para mejorar significativamente el rendimiento y la calidad del forraje; cosechar la planta con 40% de materia seca maximiza el rendimiento (26.3 t/ha) y el contenido de almidón, ya que la diferencia en la materia seca de 35% a 40% a la cosecha, genera ganancias adicionales por hectárea en producción de leche. Se corrobora y reitera la recomendación de cuidar las características del picado, la compactación del forraje y el adecuado sellado de los silos para evitar mermas y mantener la calidad del ensilaje. Se destaca el hecho de que decisiones técnicas aparentemente simples pueden tener un impacto profundo en la productividad, economía y sostenibilidad de la ganadería lechera.

En cuanto a otra importante fuente de emisiones de GEI como lo es la disposición de las excretas, se incluye un capítulo que aborda el manejo del estiércol como una estrategia clave para la descarbonización del sector lácteo en México. Su objetivo principal es destacar cómo el aprovechamiento adecuado del estiércol puede reducir emisiones de GEI, como metano y óxido nítrico, al tiempo que genera beneficios económicos y ambientales. El documento también busca romper paradigmas sobre el estiércol, presentándolo no como un desecho, sino como un recurso valioso. Se describe la diversidad de tecnologías disponibles para el manejo del estiércol, adaptables desde pequeñas unidades productivas hasta grandes establos industriales. Se enfatiza la importancia de simular los ciclos

naturales de los nutrientes para minimizar la contaminación y maximizar el aprovechamiento. El manejo adecuado del estiércol es la estrategia que rinde resultados más prácticos e inmediatos para reducir la huella de carbono del sector lácteo, y su manejo adecuado puede reducir hasta 35% de las emisiones derivadas de la producción primaria. El estiércol es una materia prima usada para fertilizantes, energía y otros productos, y no un desecho, pero la implementación de los procesos necesarios en el campo para su eficiente aprovechamiento requiere de inversión, manejo continuo y cambio de paradigmas culturales.

Como se destacó en capítulos anteriores, si bien es importante atender las fuentes de emisiones de GEI, resulta igualmente necesario intervenir para aumentar el secuestro de carbono en los suelos en uso ganadero, por lo que se incluye un capítulo sobre el manejo del suelo y captura de carbono en la principal cuenca lechera del país. Los autores, investigadores del INIFAP CENID-RASPA, destacan cómo diversas prácticas agrícolas sostenibles pueden mejorar la calidad del suelo, aumentar su capacidad de almacenar carbono y reducir emisiones de GEI mediante estrategias probadas en la Comarca Lagunera, México, para promover la recarbonización del suelo en sistemas productivos forrajeros. Se evalúan prácticas como labranza mínima, aplicación de purines (estiércol procesado) y sistemas de riego eficientes, midiendo su impacto en el carbono orgánico del suelo y la productividad agrícola. Se concluye que estas estrategias reducen emisiones de GEI, disminuyen la huella hídrica (HH), fortalecen la resiliencia climática y reducen costos de producción (fertilizantes químicos y agua) en sistemas ganaderos y agrícolas.

En cuanto a la huella hídrica de la producción lechera, se analizan estrategias para reducirla considerando factores como el clima, los sistemas de riego, la eficiencia en el uso del agua y la composición de los alimentos para el ganado, con base en estudios realizados en México, especialmente en las regiones de La Laguna (clima árido) y Aguascalientes (clima semiárido y templado), comparando datos globales para contextualizar el problema. Se concluye que en las regiones templadas (ej. Aguascalientes) se tiene menor HH que en las áridas (ej. La Laguna) debido a menores requerimientos hídricos y mayor rendimiento de forrajes; el riego por goteo y pivote central reducen la HH hasta en un 233% en comparación con el riego por gravedad; cultivos como canola y cártamo, en invierno aumentan la productividad del agua frente a opciones tradicionales de producción de forrajes. La adopción de tecnologías eficientes requiere inversiones y soporte técnico, especialmente para pequeños productores.

Pero como se ha señalado en distintos capítulos, en la estructura de la producción de leche en el país, la producción especializada, aunque es la de mayor productividad e impacto en los mercados, coexiste con sistemas denominados de

doble propósito (SBDP) en pastoreo, básicamente de las zonas tropicales, donde se combina la producción de leche y carne. De este sistema, se destaca su importancia económica y social para comunidades campesinas locales, a pesar de su baja productividad cuando se compara con la de sistemas intensivos. El SBDP utiliza principalmente vacas cruzadas (cebú x razas europeas) y se basa en el pastoreo, generalmente extensivo, de forrajes C4, de baja calidad nutricional, lo que genera altas emisiones de CH_4 y N_2O . La emisión de GEI del SBDP se puede mitigar mediante mejoras en la alimentación, medicina preventiva y manejo asociados con la productividad, pero es imprescindible mejorar el manejo de pastos, así como promover y fomentar la adopción de sistemas silvopastoriles (SSP) adaptados a cada condición local; la ganadería regenerativa y SSP aumentan la captura de carbono y reducen la huella de GEI por kg de leche producida. Por las condiciones en que opera el sistema, es muy importante evitar la deforestación y las quemas agropecuarias como elementos clave para reducir emisiones y mejorar la sostenibilidad; integrar subproductos y tecnologías locales en la alimentación del ganado promueve una bioeconomía circular. Sin embargo, inducir el uso generalizado de esos procesos requiere de políticas públicas y la aplicación de mayores recursos que apoyen la transición hacia mejores prácticas agroecológicas, con asistencia técnica y financiamiento accesible.

La denominada ganadería regenerativa se incluyó en el libro con la participación de especialistas que la promueven en una región de lechería especializada a pequeña y mediana escalas. Los autores la presentan como un modelo sustentable para sistemas lecheros familiares en los Altos de Jalisco, que apoya la regeneración de ecosistemas, mejora la productividad de los hatos y reduce su impacto ambiental negativo. Aunque el modelo regenerativo ofrece beneficios, su adopción demanda un cambio cultural en los productores, disciplina en el manejo de los recursos y apoyo para cubrir la inversión inicial que se requiere. Adicionalmente, esos sistemas, mayormente de producción familiar, enfrentan desafíos e incertidumbre, como la fluctuación de mercados, la disponibilidad limitada de tierras y la dependencia de insumos externos.

Entre las propuestas de mejora para el sector, el libro destaca la necesidad de transitar hacia sistemas alimentarios circulares en la producción láctea mexicana, enfocándose en minimizar el uso de recursos finitos (agua, energía, tierra) y revalorizar residuos orgánicos. El objetivo de ese capítulo es identificar oportunidades y rutas para implementar modelos circulares que mejoren la sostenibilidad ambiental, económica y social del sector. Para ello se combinó la revisión teórica con ejemplos prácticos, destacando principios de circularidad aplicables a la ganadería lechera. Se analizaron beneficios globales y locales, junto con limitaciones estructurales del sector en México. El modelo cierra ciclos de materiales y nutrientes, reduciendo

desperdicios y dependencia de insumos externos, propone la integración de árboles, pastos y ganado para optimizar recursos y biodiversidad y usar subproductos (estiércol, suero lácteo) como biofertilizantes o alimento animal. Los sistemas circulares minimizan el uso de recursos y emisiones, reducen costos de producción y fortalecen las economías rurales y la seguridad alimentaria local.

El sector lácteo en México, como en otras partes del mundo, es sujeto a normativas gubernamentales, motivo por el que se incluyó en este documento un capítulo que analiza la normatividad que regula el sector lácteo en México y su impacto en la sostenibilidad. Se inicia con los antecedentes de la normalización en el ámbito agroalimentario, destacando su importancia para el ordenamiento económico y la satisfacción del consumidor, aunque enfrenta desafíos como la falta de interés de las partes interesadas y la percepción de costos adicionales. En el sector lácteo, la integración de la cadena productiva ha sido complicada debido a intereses económicos divergentes entre diferentes eslabones. El marco legal mexicano se estructura de lo general a lo particular, desde derechos constitucionales hasta normas específicas, como las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y las Normas Mexicanas (NMX). La apertura comercial, impulsada por acuerdos como el TLCAN, hoy TMEC, fue clave para modernizar la legislación y delimitar responsabilidades gubernamentales en sanidad animal, salud pública y protección al consumidor y al medio ambiente, mediante normas sanitarias (ej. NOM-243-SSA1-2010), comerciales (ej. NOM-155-SCFI-2012) y ambientales (ej. NOM-001-SEMARNAT-2021). Además, las NMX, que se autoimpone cada empresa y han sido desarrolladas por el COFOCALEC, involucran características de equipos, métodos de prueba, procesos y productos, destacando su rol en mejorar la calidad e inocuidad de la leche cruda. La normatividad es esencial para garantizar calidad, inocuidad y competitividad en el sector lácteo, aunque su implementación enfrenta resistencia por percepciones de costos adicionales. Sin embargo, su aplicación ha contribuido a mejorar procesos productivos, especialmente en sanidad animal e higiene, contribuyendo a la sostenibilidad del sector. La falta de su aplicación se asocia con una débil integración de la cadena productiva y las limitaciones de las pequeñas unidades lecheras para integrarse en redes de valor, ya que requieren de mayor apoyo técnico y financiero para instrumentar el cabal cumplimiento de esos ordenamientos. La academia y la innovación son clave para actualizar las normas y responder a las demandas cambiantes, como métodos de prueba y nuevos productos.

Sin duda el trabajo por cumplir en cuanto a la sostenibilidad es enorme y permanente, destacándose la necesidad de incorporar al sistema los nuevos desarrollos tecnológicos, entre los que se encuentra la incorporación de la inteligencia artificial en diferentes procesos, razón por la que se desarrolló un capítulo donde se aborda ésta como apoyo a la sostenibilidad de las

lecherías. Se explora cómo la inteligencia artificial (IA), junto con el Internet de las Cosas (IoT) y el BigData, pueden optimizar la producción lechera, reducir su impacto ambiental y mejorar el bienestar animal. Su objetivo principal es demostrar cómo estas tecnologías permiten una “ganadería de precisión”, integrando datos para tomar decisiones en tiempo real y promover la sostenibilidad. Se aborda el tema desde una perspectiva tecnológica y práctica, describiendo sensores, sistemas de monitoreo y algoritmos de IA aplicados en lecherías. El análisis combina ejemplos concretos (como sistemas de ordeño automático) con desafíos técnicos y éticos. Entre los desafíos principales está la falta de interoperabilidad entre sistemas y la brecha tecnológica en zonas rurales, así como la necesidad de políticas de datos abiertos y capacitación para maximizar el potencial de estas tecnologías.

Finalmente, se presenta un informe del estudio de caso del Proyecto Margarita, una iniciativa de Danone de México para fortalecer la ganadería lechera sostenible entre pequeños productores. Los objetivos incluyen mejorar la productividad, reducir la huella de carbono, empoderar a los productores y promover prácticas de agricultura regenerativa, alineados con la misión de Danone de combinar impacto económico y social. Se destacan los resultados concretos a la fecha, donde se aprecia el aumento de ingresos y productividad para los productores (56% más productividad, 50% más vacas por productor y 31% menor huella de carbono desde 2020) a través de la reducción significativa de la huella de carbono (1.86 kg CO₂e/litro vs. 2.1 kg nacional). El modelo ha sido exitoso, en gran medida por las alianzas multisectoriales que se han establecido (empresa tractora, gobierno, sociedad civil y academia).

El reto de la sostenibilidad de la cadena láctea es muy grande, y sólo con el concurso de productores, procesadores, consumidores, sociedad civil, academia y gobierno puede ser abordado de manera integral, eficaz y oportuna. Ejercicios como la presente publicación, que lograron conjuntar el esfuerzo de 47 expertos de 12 instituciones, contribuyen al ejercicio de una mejor comprensión y rutas hacia la sostenibilidad de la cadena láctea en nuestro país.



EL FUTURO SOSTENIBLE DE LA LECHE EN MÉXICO de **DANONE MÉXICO** se terminó de imprimir en el mes de julio del 2025 en los talleres de Grupo Fogra (Av. Año de Juárez 223, Granjas San Antonio, Iztapalapa, 09070 Ciudad de México). En su composición se utilizará la familia tipográfica Danone One, así como papel couché tentazione FSC 150g en interiores y forros. El tiraje consta de 800 ejemplares.



