

INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN LOS SISTEMAS PECUARIOS

Producción, Bienestar Animal y Tecnologías Emergentes



Marquez-López, Mayra Carolina;
Díaz-Pabló, María Elena;
Vásquez-Macedo, Hernando;
Paima-Ramírez, Gabriel Enrique;
Ibérico-Llanos, Milagros Medalit;
Ibérico-Vela, Orlando;
Llanos-Cortegana, Gladys Amable;
Gómez-Matos, Homero Josue;
Balarezo-Urresta, Luis Rodrigo.



OM
EDITORIAL

INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN LOS SISTEMAS PECUARIOS

Producción, Bienestar Animal y Tecnologías Emergentes.

Autor/es:

Marquez-López, Mayra Carolina

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Díaz-Pabló, María Elena

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Vásquez-Macedo, Hernando

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Paima-Ramírez, Gabriel Enrique

Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas

Ibérico-Llanos, Milagros Medalit

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Ibérico-Vela, Orlando

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Llanos-Cortegana. Gladys Amable

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Gómez-Matos, Homero Josue

Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Perú

Balarezo-Urresta, Luis Rodrigo

Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC)

Datos de Catalogación Bibliográfica

Marqu ez-López, M. C.
Díaz-Pabl , M. E.
Vásquez-Macedo, H.
Paima-Ramírez, G. E.
Ibérico-Llanos, M. M.
Ibérico-Vela, O.
Llanos-Cortegana, G. A.
Gómez-Matos, H. J.
Balarezo-Urresta, L. R.

**Innovación y Sostenibilidad en los Sistemas Pecuarios: Producción,
Bienestar Animal y Tecnologías Emergentes**

Oriente-Manabí Editorial, Ecuador, 2026
ISBN: 978-9907-9567-4-0
Formato: 210 mm X 270 mm

119 págs.



Publicado por Oriente-Manabí Editorial

Ecuador, Manabí, Cod. Post. 130101.

Contacto: +593 959 723 343

Email: info@omeditorial.com

www.books.omeditorial.com

Director General:	<i>Dr. Guerrero Bermúdez �ngel Enrique</i>
Editor en Jefe:	<i>Dr. Guerrero Bermúdez �ngel Enrique</i>
Editor Académica:	<i>Lcdo. Oltramonti Roberto, Mg</i>
Supervisor de Producción:	<i>Ing. Barragán Monrroy Roberto Johan, Mg.</i>
Diseño:	OM Editorial
Consejo Editorial	<i>OM Editorial</i>

  Agosto, 2026

Libro Digital, Primera Edición, 2026

Editado, Diseñado, Diagramado y Publicado por [Comité OM Editorial](#)

Manabí, Ecuador, 2026

D.R.   2026 por Autores y OM Editorial Ecuador.

Cámara Ecuatoriana del Libro con Radicación editorial 182865

Disponible para su descarga gratuita en www.books.omeditorial.com

Los contenidos de este libro pueden ser descargados, reproducidos, difundidos e impresos con fines de estudio, investigación y docencia o para su utilización en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca adecuadamente a los autores como fuente y titulares de los derechos de propiedad intelectual, sin que ello implique en modo alguno que aprueban las opiniones, productos o servicios resultantes. En el caso de contenidos que indiquen expresamente que proceden de terceros, deberán dirigirse a la fuente original indicada para gestionar los permisos.

Título del libro:

Innovación y Sostenibilidad en los Sistemas Pecuarios: Producción, Bienestar Animal y Tecnologías Emergentes

© Marquez-López, Mayra Carolina; Díaz-Pabló, María Elena; Vásquez-Macedo, Hernando; Paima-Ramírez, Gabriel Enrique; Ibérico-Llanos, Milagros Medalit; Ibérico-Vela, Orlando; Llanos-Cortegana, Gladys Amable; Gómez-Matos, Homero Josue; Balarezo-Urresta, Luis Rodrigo.

ISBN: 978-9907-9567-4-0



<https://doi.org/10.63618/omeditorial/l29>

Como citar (APA 7ma Edición):

Marquez-López, M. C., Díaz-Pabló, M. E., Vásquez-Macedo, H., Paima-Ramírez, G. E., Iberico-Llanos, M. M., Iberico-Vela, O., Llanos-Cortegana, G. A., Gómez-Matos, H. J., & Balarezo-Urresta, L. R. (2026). *Innovación y Sostenibilidad en los Sistemas Pecuarios: Producción, Bienestar Animal y Tecnologías Emergentes*. Oriente-Manabí Editorial. <https://doi.org/10.63618/omeditorial/l29>

Cada uno de los textos de OM Editorial han sido sometido a un proceso de evaluación por pares doble ciego externos (double-blind paper review) con base en la normativa del editorial.

Revisores:

Ing. Rodrigo Cabrera Verdezoto,
PhD

Universidad Estatal del Sur de
Manabí– Ecuador



Ing. Zoot. Carlos Javier Meza
Bone, PhD.

Universidad Técnica Estatal De
Quevedo– Ecuador

**Aviso Legal:**

La información presentada, así como el contenido, fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias de este manuscrito es de exclusiva responsabilidad del/los autores/es y no necesariamente reflejan el pensamiento de la OM Editorial.

Derechos de autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de la OM Editorial y sus Autores. Se prohíbe rigurosamente, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma de ninguna forma o por cualquier medio, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright, salvo cuando se realice con fines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial. Las opiniones expresadas en los capítulos son responsabilidad de los autores

Reseña de Autores



Marquez-López, Mayra Carolina



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



mayra.marquez@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0003-3922-053X>



Ingeniera Zootecnista por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), colegiada y habilitada para el ejercicio profesional. Bachiller en Educación, con Maestría en Gestión Pública y Maestría en Educación. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias con mención en Producción Animal y del Doctorado en Educación. Cuenta con experiencia profesional en los sectores público y privado, desempeñándose en actividades de docencia, investigación y extensión universitaria. Actualmente es docente de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), sede Yurimaguas, donde participa en la formación de profesionales y en el desarrollo de proyectos de investigación orientados al fortalecimiento del sector agropecuario y la educación superior.



Díaz-Pabló, María Elena



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



maria.diaz@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0002-2026-3559>



Ingeniera Zootecnista y Magíster en Producción Animal por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), donde también obtuvo su Doctorado, Doctoris Philosophiae en Agricultura Sustentable. Su sólida formación académica la ha posicionado como una referente en el desarrollo pecuario sostenible y la investigación aplicada. Con una destacada trayectoria de 30 años en la docencia universitaria, se desempeña como Docente Principal en la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Su liderazgo institucional la llevó a ocupar la Dirección del Instituto de Investigación de dicha facultad (2008-2013), desde donde impulsó la generación de ciencia adaptada a los desafíos de los ecosistemas tropicales. Línea de investigación: Innovaciones Tecnológicas y Procesos productivos sustentables. Área, Alimentación Animal y Biotecnología reproductiva. Sistemas de Producción Sustentable en la Amazonía.



Vásquez-Macedo, Hernando



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



hernando.vasquez@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0003-1803-6397>



Ingeniero Agrónomo, egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con maestría en Ciencias, mención Ecología y Desarrollo Sostenible por la misma institución. Docente de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, donde desarrolla labores de enseñanza e investigación en el área pecuaria, con un enfoque de Desarrollo Sostenible. Con experiencia en ganadería tropical.



Paima-Ramírez, Gabriel Enrique



Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas



gepaimar@unaaa.edu.pe



<https://orcid.org/0009-0005-0360-0612>



Ingeniero Zootecnista, con Maestría en Gestión y Maestría en Docencia Universitaria; actualmente cursa estudios de Doctorado en Educación y Producción Animal. Realizó prácticas profesionales durante ocho años consecutivos en la Universidad Nacional Agraria La Molina, en las áreas de porcinos, aves, bovinos y curtiembre. Cuenta con más de 30 años de experiencia en Educación Básica Regular. Desde 2014 es instructor del SENATI y, desde hace más de cinco años, docente universitario en la UNAAA y la UNAP. Asimismo, posee experiencia como formulador de proyectos de inversión pública y ha sido distinguido en los concursos Crea y Emprende, Eureka del Ministerio de Educación y FlexSim de SENATI.



Iberico-Llanos, Milagros Medalit



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



mibella40ygs@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0003-9463-824X>



Bióloga Acuícola, Egresada de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana - Facultad de Ciencias Biológicas, especialidad en Acuicultura, con Maestría en Gestión Pública (Universidad Cesar Vallejo), con estudio en curso en el Doctorado en Ciencias, con Mención en Producción Animal, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca. Docente contratado del 2015 al 2023 de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), con una trayectoria de 8 años en la Docencia Universitaria, desarrollando tesis con los alumnos en Nutrición, producción piscícola y apoyo en prácticas pre-profesionales en Sanidad Acuícola. También como docente universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas (UNAAA) en el año 2021 al 2024., Coordinadora del Proyecto Piscícola de la Gerencia sub-regional de Alto Amazonas.



Iberico-Vela, Orlando



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



orlando.iberico@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0003-4161-9785>



Médico Veterinario, Egresado de la Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ciencia Veterinarias, con Maestría en Salud Pública de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, con estudio terminado en Doctorado en Ciencias, con Mención en Producción Animal., de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca. Docente Asociado de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), con una trayectoria de 32 años en la Docencia Universitaria, donde desarrollo labores de Enseñanza e Investigación en el área Pecuaria en Sanidad Animal.



Llanos-Cortegana, Gladys Amable



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



gladys.llanos@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0001-6921-9076>



Médico Veterinario, Egresada de la Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ciencia Veterinarias, con Maestría en Educación con Mención en Docencia y Gestión Educativa (Universidad Cesar Vallejo), con estudio terminado en Doctorado en Ciencias, con Mención en Producción Animal, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca. Docente Asociado de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), con una trayectoria de 30 años en la Docencia Universitaria, donde desarrollo labores de Enseñanza e Investigación en el área Pecuaria en Sanidad.



Gómez-Matos, Homero Josué



Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – Perú



hgomez@unamad.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0001-8598-5782>



Magíster en Nutrición Animal (M.Sc.) por la Universidad Nacional Agraria La Molina e Ingeniero Pesquero con más de 15 años de trayectoria, especializado en piscicultura semiintensiva y manejo productivo de peces amazónicos. Aporta sólida capacidad técnica y de decisión en la gestión pública pesquera y acuícola, con experiencia en planificación e implementación de políticas sectoriales en Madre de Dios. Conduce transferencia tecnológica y capacitación en comunidades nativas. Primer puesto en el Concurso Nacional de Proyectos de Investigación Pesquera (SNP). Docente universitario con más de 10 años de ejercicio, actualmente en la UNAMAD, y formulador de proyectos para PNIPA y ProInnovate.



Balarezo-Urresta, Luis Rodrigo



Universidad Politécnica Estatal del Carchi
(UPEC)



luis.balarezo@upec.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5546-1259>



Doctor en Medicina Veterinaria y Zootecnia por la Universidad Central del Ecuador, con especializaciones en Reproducción Animal, Sanidad Animal Avanzada, Nutrición y Reproducción, además de una Maestría en Producción Animal y un PhD en Ciencias Veterinarias. Desde 2009 se desempeña como docente titular de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC), impartiendo asignaturas relacionadas con fisiología, nutrición, producción ganadera y biotecnología reproductiva.

Cuenta con amplia experiencia profesional en producción, reproducción, sanidad y nutrición animal, tanto en el ámbito académico como productivo. Ha ejercido cargos directivos en la UPEC, entre ellos Director de Carrera, Director del Centro de Posgrados y Director del Centro de Investigación y Transferencia Tecnológica. Es autor y coautor de artículos científicos y tutor de tesis de grado y maestría.

Su trayectoria ha sido reconocida con distinciones académicas nacionales e internacionales, entre ellas medalla de oro como mejor egresado, becas internacionales de formación en España e Israel, premio al mejor artículo científico y reconocimiento como mejor docente de la UPEC en 2017. Asimismo, presidió el Colegio de Médicos Veterinarios del Carchi durante el periodo 2020–2024.

Índice

Reseña de Autores.....	vi
Índice	xv
Índice de Tablas	xx
Índice de Figuras	xxi
Introducción	xxiii
Capítulo I. Sistemas pecuarios en transformación: entre la demanda de alimentos y los límites ambientales.....	1
1.1. La ganadería dentro de un sistema alimentario que está cambiando ..	2
1.1.1. Producción animal, alimentación y seguridad alimentaria	2
1.1.2. De los sistemas pastoriles a la producción intensiva: una realidad diversa	4
1.1.3. Consumo, mercados y nuevas exigencias sobre el sector pecuario	8
1.2. La dimensión ambiental de producir alimentos de origen animal	10
1.2.1. Emisiones, metano y contribución al cambio climático	10
1.2.2. Suelo, agua y biodiversidad bajo presión	12
1.2.3. Lo que muestran —y lo que no muestran— las huellas ambientales	14
1.3. Producir en un clima menos predecible	16
1.3.1. Estrés térmico y efectos sobre los animales.....	16
1.3.2. Pasturas, disponibilidad de agua y variabilidad productiva	17
1.3.3. Adaptación de los sistemas pecuarios frente al riesgo climático.	19
1.4. Sostenibilidad pecuaria: más allá de reducir emisiones	21
1.4.1. Productividad, rentabilidad y permanencia del productor	21
1.4.2. La dimensión social y territorial de la ganadería.....	22
1.4.3. Tensiones entre eficiencia, ambiente y bienestar animal	23

1.5.	¿Qué tendría que cambiar?.....	25
1.5.1.	Del diagnóstico ambiental a la transformación del sistema.....	25
1.5.2.	Decisiones distintas para territorios y productores distintos	26
Capítulo II. Repensar la producción: eficiencia, resiliencia y aprovechamiento de los recursos		29
2.1.	Alimentar mejor antes que simplemente producir más	30
2.1.1.	Nutrición de precisión y eficiencia en el uso de nutrientes	30
2.1.2.	Recursos alimentarios locales y materias primas alternativas	33
2.1.3.	Subproductos agroindustriales y nuevas fuentes de alimentación	36
2.2.	El desafío del metano y otras pérdidas del sistema.....	37
2.2.1.	¿De dónde proceden las emisiones dentro de una explotación pecuaria?	37
2.2.2.	Estrategias nutricionales para disminuir el metano entérico.....	38
2.2.3.	Mitigar sin trasladar el problema: límites y efectos no deseados	42
2.3.	Animales adaptados a sistemas que también están cambiando	44
2.3.1.	Diversidad genética y valor de las razas adaptadas localmente .	44
2.3.2.	Selección por eficiencia, rusticidad, salud y longevidad	45
2.3.3.	Genética y ambiente: por qué no existe un animal ideal para todos los sistemas	46
2.4.	Pasturas, árboles y territorio.....	47
2.4.1.	Manejo del pastoreo y recuperación de suelos.....	47
2.4.2.	Sistemas silvopastoriles e integración de componentes productivos	48
2.4.3.	Agua, sombra y microclimas como recursos productivos.....	49
2.5.	Cuando los residuos dejan de ser residuos	50
2.5.1.	Estiércol, nutrientes y fertilidad del suelo.....	50
2.5.2.	Biogás y recuperación de energía.....	51

2.5.3.	La granja dentro de una economía circular.....	52
2.6.	La sostenibilidad también tiene que ser viable.....	53
2.6.1.	Costos, retornos y decisiones del productor	53
2.6.2.	De las experiencias exitosas a soluciones que puedan escalarse	55
Capítulo III. El animal en el centro: bienestar, salud y responsabilidad compartida		57
3.1.	Qué significa realmente que un animal esté bien	58
3.1.1.	Del concepto tradicional de bienestar a los enfoques actuales...	58
3.1.2.	Salud, comportamiento y estado emocional	60
3.1.3.	Indicadores para evaluar el bienestar en condiciones reales de producción.....	61
3.2.	Bienestar a lo largo de la vida productiva	63
3.2.1.	Alimentación, alojamiento y confort.....	63
3.2.2.	Manejo, interacción humana y procedimientos rutinarios.....	64
3.2.3.	Transporte y final de la vida productiva	65
3.3.	La salud del rebaño comienza antes de la enfermedad	67
3.3.1.	Prevención, vigilancia y bioseguridad	67
3.3.2.	Enfermedades emergentes y nuevos escenarios epidemiológicos	69
3.3.3.	Uso responsable de antimicrobianos y resistencia antimicrobiana	70
3.4.	Una sola salud en un sistema compartido	71
3.4.1.	Las conexiones entre animales, personas y ambiente	71
3.4.2.	Zoonosis e inocuidad dentro de las cadenas pecuarias.....	72
3.4.3.	One Health como marco para la toma de decisiones	73
3.5.	Bienestar animal, mercado y legitimidad social	74

3.5.1.	Lo que demandan consumidores, normas y cadenas comerciales	74
3.5.2.	Entre la certificación y el bienestar real	75
3.5.3.	¿Hasta dónde debe llegar la responsabilidad del sistema productivo?.....	76
Capítulo IV. De la ganadería de precisión a los sistemas pecuarios inteligentes		79
4.1.	Del registro manual al animal conectado	80
4.1.1.	Sensores y dispositivos de monitoreo	80
4.1.2.	Internet de las cosas dentro de la explotación.....	82
4.1.3.	Datos continuos frente a observaciones puntuales	84
4.2.	Ver, escuchar y anticipar lo que ocurre en la granja	85
4.2.1.	Visión computacional y reconocimiento automático de animales	85
4.2.2.	Movimiento, conducta, sonidos y señales fisiológicas	86
4.2.3.	Detección temprana de alteraciones productivas, sanitarias y de bienestar	87
4.3.	Cuando los datos comienzan a tomar parte en las decisiones.....	89
4.3.1.	Inteligencia artificial y aprendizaje automático.....	89
4.3.2.	Predicción de producción, reproducción y enfermedad	90
4.3.3.	Modelos digitales y gemelos virtuales del sistema pecuario	92
4.4.	Automatizar la granja.....	93
4.4.1.	Alimentación y ordeño automatizados	93
4.4.2.	Robótica aplicada al manejo y monitoreo	93
4.4.3.	Qué cambia para el trabajador y para el animal	94
4.5.	La revolución biológica también está en marcha	95
4.5.1.	Genómica y fenotipado de precisión	95
4.5.2.	Microbioma, biomarcadores y tecnologías ómicas	96
4.5.3.	Edición genética: posibilidades que también plantean límites.....	97

4.6.	Tecnología para quién y en qué condiciones.....	98
4.6.1.	Costos, conectividad y brecha tecnológica.....	98
4.6.2.	Datos pecuarios: propiedad, privacidad y seguridad	99
4.6.3.	Algoritmos, dependencia tecnológica y capacidad de decisión del productor	100
4.7.	El sistema pecuario que viene.....	101
4.7.1.	Integrar productividad, bienestar y desempeño ambiental	101
4.7.2.	Tecnologías prometedoras frente a tecnologías realmente aplicables	102
4.7.3.	Innovar sin perder de vista al territorio, al productor y al animal.....	104
	Referencias Bibliográficas.....	107

Índice de Tablas

Tabla 1. Rasgos que diferencian los principales sistemas pecuarios	7
Tabla 2. Principales fuentes de gases de efecto invernadero en los sistemas pecuarios	12
Tabla 3. Estrategias de adaptación climática y posibles efectos asociados	20
Tabla 4. Recursos alimentarios alternativos: potencial productivo y condiciones para su utilización.....	35
Tabla 5. Principales estrategias nutricionales para reducir metano entérico y límites de aplicación	41
Tabla 6. Opciones de manejo del estiércol y principales compensaciones	51
Tabla 7. Ejemplos de indicadores de bienestar aplicables en condiciones productivas	62
Tabla 8. Diferencias funcionales entre bioseguridad externa e interna.....	68
Tabla 9. Lectura práctica de las principales métricas utilizadas en modelos pecuarios	88
Tabla 10. Madurez y condiciones de aplicación de tecnologías analizadas ...	104

Índice de Figuras

Figura 1. Diversidad de los sistemas pecuarios y sus principales interacciones	8
Figura 2. Origen de las emisiones en una cadena pecuaria y límites posibles de evaluación	12
Figura 3. Mapa de sinergias y tensiones en la sostenibilidad pecuaria	24
Figura 4. Flujo de nutrientes y puntos de pérdida dentro de una explotación pecuaria.....	33
Figura 5. Estrategias de mitigación del metano según el punto de intervención	42
Figura 6. Arquitectura funcional de un sistema silvopastoril.....	49
Figura 7. Circuito de economía circular dentro y alrededor de la explotación pecuaria.....	53
Figura 8. Evaluación multidimensional del bienestar animal	63
Figura 9. Ruta preventiva de salud dentro de la explotación.....	68
Figura 10. Interfaz One Health en la cadena pecuaria	74
Figura 11. Arquitectura funcional de una explotación pecuaria conectada.....	84
Figura 12. De la señal biológica a una decisión verificable	89
Figura 13. Integración del sistema pecuario inteligente	102

Introducción

La producción pecuaria atraviesa una etapa de transformación que obliga a mirar más allá de los indicadores tradicionales de rendimiento, pues, aunque producir carne, leche, huevos y otros alimentos de origen animal continúa siendo una función esencial para la seguridad alimentaria y para las economías rurales, las condiciones bajo las cuales se desarrolla esta actividad han cambiado de manera significativa. La presión sobre los recursos naturales, las variaciones climáticas, las exigencias relacionadas con el bienestar animal, la incorporación acelerada de nuevas tecnologías y una sociedad cada vez más atenta al origen de los alimentos están modificando la forma en que se conciben y gestionan los sistemas pecuarios, de modo que la búsqueda de una mayor productividad ya no puede separarse del cuidado de los animales, de la sostenibilidad ambiental ni de las condiciones sociales y económicas de quienes sostienen diariamente la producción.

Esta transformación adquiere especial importancia en América Latina, donde la actividad pecuaria mantiene una relación estrecha con el territorio, el empleo rural, la disponibilidad de alimentos y las formas de vida de numerosas comunidades, dentro de una realidad productiva caracterizada por profundas diferencias entre explotaciones altamente tecnificadas, unidades familiares con recursos limitados, sistemas extensivos asociados a grandes superficies y modelos intensivos vinculados con cadenas comerciales cada vez más especializadas. Países como el Perú expresan buena parte de esa heterogeneidad, debido a la diversidad de condiciones ambientales, sociales y productivas presentes entre regiones, circunstancia que obliga a evitar soluciones uniformes y favorece, en cambio, enfoques capaces de reconocer las particularidades de cada territorio y las capacidades reales de productores, profesionales y comunidades.

Repensar la producción supone también revisar aquello que durante décadas se entendió como eficiencia, ya que aumentar los rendimientos continúa siendo necesario, pero deja de ser suficiente cuando ese incremento se alcanza acompañado de mayores riesgos sanitarios, deterioro ambiental, pérdida de bienestar animal o creciente vulnerabilidad económica. Un sistema pecuario

sostenible requiere encontrar equilibrios entre productividad, uso responsable de los recursos, estabilidad financiera y capacidad de adaptación, entendiendo la unidad productiva como una red de relaciones donde alimentación, genética, instalaciones, manejo, salud, agua, energía, suelo, trabajo y mercado se condicionan mutuamente; por esta razón, intervenir en un componente sin considerar sus efectos sobre los demás puede generar mejoras inmediatas y, al mismo tiempo, trasladar nuevas dificultades hacia otras partes del sistema.

Dentro de esa comprensión integral, el bienestar y la salud animal dejan de ocupar un lugar secundario para convertirse en componentes estrechamente vinculados con la calidad, la eficiencia y la sostenibilidad de la producción, puesto que las condiciones de alojamiento, nutrición, comportamiento, manejo y atención sanitaria influyen tanto en la respuesta biológica de los animales como en los resultados obtenidos por la explotación. La gestión responsable requiere reconocer de manera temprana signos de enfermedad, estrés o alteraciones conductuales, pero también construir condiciones capaces de prevenirlos, articulando conocimiento científico, observación cotidiana y criterios éticos para evitar que las decisiones económicas se desliguen de las necesidades propias de cada especie y de los límites que impone su funcionamiento biológico.

A esta transformación se suma una incorporación tecnológica que amplía de manera considerable las posibilidades de seguimiento y gestión de los sistemas pecuarios, mediante sensores, dispositivos de identificación, sistemas de posicionamiento, cámaras, registros digitales, plataformas de gestión, herramientas de análisis de datos e inteligencia artificial capaces de generar información con una precisión difícil de alcanzar únicamente mediante observación ocasional. Su verdadero aporte, sin embargo, no radica en sustituir la experiencia humana, sino en fortalecerla, pues una alerta automática puede identificar variaciones en la actividad de un animal y un modelo puede reconocer patrones dentro de grandes volúmenes de información, aunque la interpretación de esos resultados todavía necesita considerar el contexto biológico, productivo, económico y territorial en el que se producen.

Hablar de sistemas pecuarios inteligentes implica, por esa razón, alejarse de la imagen de explotaciones gobernadas exclusivamente por algoritmos y

comprender la inteligencia como el resultado de integrar datos, modelos, conocimiento biológico, infraestructura y capacidad humana para tomar decisiones contextualizadas. Productores, veterinarios, técnicos, investigadores y otros actores conservan un papel decisivo porque son quienes interpretan las señales, contrastan la información con la experiencia y valoran las consecuencias de una determinada intervención; la tecnología alcanza así mayor utilidad cuando permite anticipar problemas, mejorar el seguimiento y respaldar decisiones más oportunas, sin ignorar las restricciones materiales, laborales, ambientales y económicas que acompañan a cada sistema de producción.

Sobre estas bases, el libro desarrolla cuatro dimensiones que permiten comprender de manera articulada la transformación pecuaria contemporánea: el primer capítulo examina los cambios que experimentan los sistemas pecuarios y las fuerzas que están redefiniendo su desarrollo; el segundo profundiza en la necesidad de repensar la producción mediante criterios que integren eficiencia, sostenibilidad y adaptación; el tercero aborda el bienestar, la salud y la responsabilidad como componentes inseparables de una práctica técnicamente sólida y éticamente consistente, mientras que el cuarto analiza el surgimiento de los sistemas pecuarios inteligentes y las posibilidades abiertas por las tecnologías digitales sin desplazar el conocimiento humano ni las particularidades del territorio. El recorrido no pretende presentar una fórmula única para el futuro de la actividad, sino comprender la producción pecuaria como un sistema vivo y cambiante donde innovación, conocimiento y responsabilidad necesitan avanzar de manera conjunta frente a los desafíos alimentarios, ambientales, productivos y sociales de las próximas décadas.

Capítulo I. Sistemas pecuarios en transformación: entre la demanda de alimentos y los límites ambientales

Sistemas pecuarios en transformación: entre la demanda de alimentos y los límites ambientales

1.1. La ganadería dentro de un sistema alimentario que está cambiando

1.1.1. Producción animal, alimentación y seguridad alimentaria

La producción pecuaria ocupa una posición difícil de reducir a una sola función dentro de los sistemas alimentarios, porque carne, leche, huevos y otros productos de origen animal forman parte de las dietas de amplios grupos de población, aunque su importancia nutricional, económica y cultural cambia entre territorios, sistemas productivos y estratos de ingreso. En países donde las dietas ya contienen cantidades elevadas de determinados productos animales, el debate suele concentrarse en los posibles efectos de un consumo excesivo y en alternativas de sustitución parcial; en regiones donde persisten deficiencias de proteínas y micronutrientes, la preocupación puede ser distinta y centrarse en cómo ampliar el acceso a alimentos nutricionalmente densos sin aumentar de forma desproporcionada la presión sobre los recursos naturales. La FAO (2023a) señala precisamente esa heterogeneidad al evaluar la contribución de los alimentos terrestres de origen animal a las dietas saludables, evitando presentar una recomendación dietética única como respuesta válida para poblaciones con realidades nutricionales muy diferentes.

Los productos de origen animal aportan proteínas de elevada calidad biológica, además de hierro, zinc, vitamina B12, calcio y otros nutrientes relevantes durante determinadas etapas de la vida; ese aporte, sin embargo, no significa que una dieta con elevada presencia de carne o productos lácteos constituya una condición universal para alcanzar una nutrición adecuada. Wood et al. (2024) muestran que la relación entre alimentos animales, salud y sostenibilidad cambia según el tipo y la cantidad consumida, la composición global de la dieta y las condiciones socioeconómicas de la población, mientras que Qaim et al. (2024) llegan a una conclusión compatible al advertir que las comparaciones entre productos animales y alternativas vegetales pierden capacidad explicativa cuando se ignoran diferencias nutricionales, ambientales y territoriales.

La contribución de la ganadería a la seguridad alimentaria tampoco termina en el alimento que llega al consumidor. Los animales pueden transformar pastos, residuos agrícolas, subproductos de la agroindustria y materiales fibrosos que las personas no consumen directamente en leche, carne, huevos, estiércol y otros bienes con valor económico; en sistemas mixtos, esta capacidad permite además integrar actividades agrícolas y pecuarias mediante el reciclaje de nutrientes, la utilización de rastrojos y la diversificación de ingresos. La función resulta especialmente visible en territorios rurales donde el ganado actúa también como reserva económica frente a cosechas deficientes, fluctuaciones de precios o emergencias familiares, aunque esa característica no aparece con igual intensidad en todos los sistemas ni debería confundirse con una justificación automática de cualquier modalidad productiva.

La escala social de estas cadenas ayuda a explicar por qué su transformación tiene consecuencias que van más allá de una modificación técnica dentro de la finca. La FAO (2026) señala que más de mil millones de personas participan o dependen de alguna forma de las cadenas pecuarias en el mundo, dentro de un conjunto muy heterogéneo que incluye pequeños productores, pastores, trabajadores, procesadores y actores comerciales; la estimación no implica que todos ellos dependan exclusivamente de los animales ni que compartan las mismas condiciones económicas, pero muestra que intervenir sobre la producción pecuaria afecta simultáneamente alimentación, empleo, comercio, activos familiares y dinámicas territoriales.

La demanda ha cambiado al mismo tiempo que se transformaron las estructuras productivas. Durante las últimas décadas aumentó con fuerza la oferta mundial de determinados productos animales, especialmente carne de aves, carne de cerdo y huevos, aunque el crecimiento no ocurrió de manera uniforme entre países ni grupos de ingreso; según la FAO (2026), esta evolución responde a la interacción entre crecimiento poblacional, urbanización, ingreso, precios relativos, disponibilidad, infraestructura comercial, preferencias culturales y políticas públicas. La relación, por ello, resulta bastante más compleja que una secuencia en la cual más población conduce de forma automática a mayor consumo de carne.

La urbanización modifica dónde se adquieren los alimentos, cuánto procesamiento incorporan, qué logística necesitan y qué atributos considera relevantes el comprador, mientras el incremento del ingreso puede elevar inicialmente el consumo de ciertos productos animales y después perder fuerza a medida que las dietas se estabilizan o aparecen otras preocupaciones relacionadas con salud, ambiente y bienestar. Wood et al. (2024) describen una tendencia de estabilización o reducción del consumo de algunas carnes en segmentos de países de altos ingresos que convive con un crecimiento todavía significativo en distintas economías de ingresos bajos y medios, de modo que el sistema pecuario mundial no se enfrenta a una sola trayectoria de demanda, sino a varias transiciones simultáneas.

La discusión deja entonces de poder plantearse únicamente en términos de producir más o producir menos. Importa saber qué alimentos necesitan los distintos grupos sociales, cuáles son accesibles, qué recursos se utilizan para obtenerlos y cómo se distribuyen los costos asociados a esa producción; sostener los medios de vida rurales y mejorar la disponibilidad de alimentos son objetivos relevantes, aunque ninguno elimina las restricciones ambientales, del mismo modo que disminuir una determinada huella ecológica no debería analizarse ignorando sus posibles consecuencias nutricionales, económicas o distributivas.

1.1.2. De los sistemas pastoriles a la producción intensiva: una realidad diversa

Hablar de “la ganadería” como si correspondiera a un único modelo productivo simplifica una realidad caracterizada precisamente por la diversidad. Un bovino mantenido sobre vegetación natural en una zona semiárida, una vaca lechera alimentada mediante una ración formulada en una explotación especializada, una unidad de producción avícola altamente automatizada y un pequeño rebaño integrado a cultivos familiares generan alimentos a partir de combinaciones diferentes de tierra, agua, energía, alimento, capital, trabajo y tecnología; esa configuración determina buena parte de sus resultados productivos, ambientales y económicos.

El IPCC (2022) diferencia sistemas basados en pastizales, modalidades mixtas de agricultura y ganadería y producciones de carácter más intensivo o industrial, una clasificación que adquiere importancia porque cada modalidad responde de manera distinta a las restricciones de tierra, variabilidad climática, costos de alimentación y disponibilidad tecnológica. Las categorías, además, no forman compartimentos completamente cerrados: existen numerosas configuraciones intermedias en las cuales los animales pastorean durante una parte del ciclo, reciben suplementación en determinados periodos o dependen de cultivos producidos dentro de la misma explotación.

Los sistemas pastoriles aprovechan grandes superficies de pastizales y ambientes donde la agricultura puede presentar restricciones climáticas, topográficas o edáficas considerables; allí, la movilidad de los animales, el ajuste de la carga y la capacidad de responder a una oferta vegetal cambiante forman parte del manejo productivo. Su rendimiento por animal o por hectárea puede ser inferior al de sistemas de mayor intensificación, pero evaluar únicamente ese indicador deja fuera el hecho de que parte de la producción se obtiene utilizando biomasa que difícilmente podría incorporarse de manera directa a la alimentación humana. El problema aparece cuando la cantidad o permanencia de animales supera la capacidad de recuperación de la vegetación, porque entonces una estrategia adaptada a la variabilidad puede convertirse en un factor de degradación.

La agricultura familiar presenta una combinación diferente. Los animales pueden consumir residuos de cosechas, proporcionar estiércol, generar ingresos complementarios y reducir la dependencia económica de un solo cultivo, aunque la pequeña escala no garantiza automáticamente un mejor desempeño ambiental o social; restricciones en acceso a asistencia veterinaria, genética, calidad de alimento, infraestructura, financiamiento o mercados pueden reducir la productividad y aumentar pérdidas que repercuten tanto sobre el ingreso familiar como sobre la utilización de recursos.

En el otro extremo del continuo productivo, los sistemas intensivos recurren a una elevada especialización, alimentación formulada, genética seleccionada, instalaciones controladas y cadenas logísticas capaces de mover grandes

volúmenes de insumos y producto. Greenwood (2021), al revisar distintas configuraciones de producción bovina, muestra que una mayor productividad puede reducir determinados impactos cuando estos se expresan por unidad producida, pero también aumenta la importancia del origen del alimento, el manejo de estiércoles, la energía utilizada y las condiciones de alojamiento; concentrar animales facilita controlar algunos procesos y, al mismo tiempo, concentra riesgos que requieren una gestión mucho más precisa.

Dos sistemas que entregan al mercado un kilogramo del mismo producto pueden, por tanto, movilizar cantidades muy distintas de tierra, agua, alimento y energía. La duración del ciclo productivo, fertilidad, mortalidad, tasa de crecimiento, digestibilidad de la dieta, procedencia del alimento y manejo de residuos modifican el resultado, mientras el bienestar animal tampoco puede inferirse únicamente a partir de una etiqueta como “intensivo” o “extensivo”. Un animal que dispone de mayor espacio puede expresar más conductas naturales y, a la vez, quedar expuesto a calor extremo, parasitismo o escasez de alimento; un sistema confinado puede protegerlo frente a determinadas condiciones ambientales y facilitar la atención sanitaria, aunque también restringir el movimiento o determinadas conductas si las instalaciones se diseñan de manera inadecuada.

Tabla 1.

Rasgos que diferencian los principales sistemas pecuarios

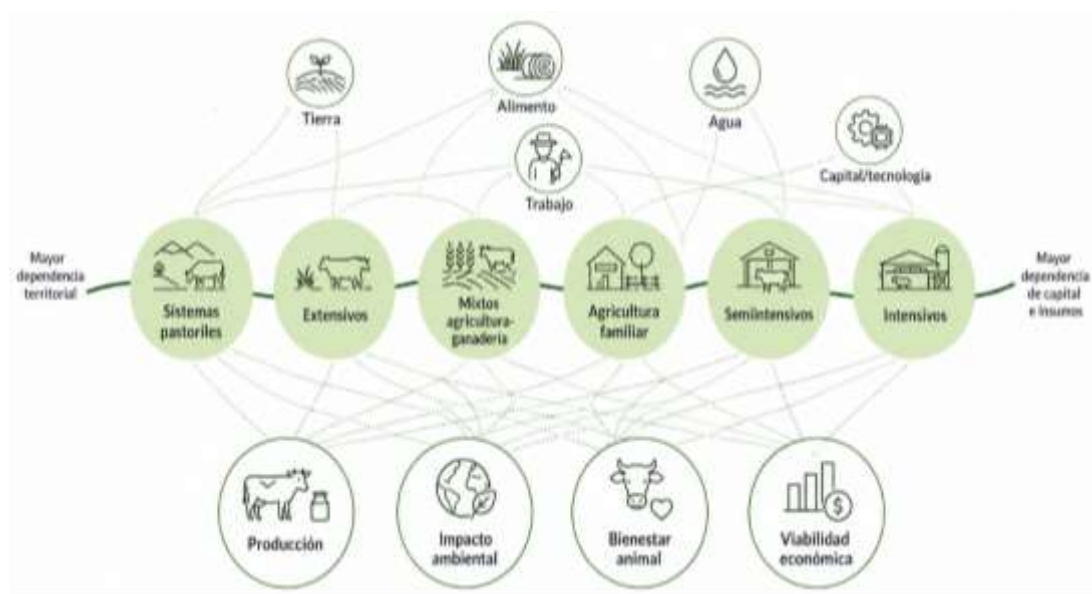
Sistema	Base alimentaria predominante	Características productivas	Oportunidades	Riesgos o presiones
Pastoril	Vegetación natural y pastizales	Movilidad y fuerte dependencia climática	Aprovechamiento de tierras poco aptas para cultivos; funciones territoriales	Sequía, degradación con cargas inadecuadas, dificultades de acceso a servicios
Extensivo	Pasturas naturales o cultivadas	Baja o moderada carga animal	Utilización de recursos locales y menor concentración de residuos	Mayor superficie por unidad producida y exposición climática

Mixto agricultura-ganadería	Cultivos, residuos y pasturas	Integración agrícola y pecuaria	Reciclaje de nutrientes y diversificación	Competencia interna por recursos y mayor complejidad de manejo
Semiintensivo	Pastoreo y suplementación	Intensidad intermedia	Flexibilidad productiva	Dependencia parcial de insumos externos
Intensivo	Raciones formuladas y alimentos concentrados	Alta productividad y especialización	Elevada producción por unidad de superficie y mayor control	Concentración de estiércol, dependencia de insumos y riesgos de bienestar
Agricultura familiar	Recursos propios y compras variables	Elevada heterogeneidad	Diversificación, empleo familiar y utilización de subproductos	Restricciones financieras, tecnológicas y comerciales

La escala desde la cual se observa el sistema también modifica la interpretación. Alary et al. (2022) muestran que la sostenibilidad de la ganadería en zonas secas puede ofrecer resultados diferentes cuando se evalúa a nivel del rebaño, del hogar o del territorio, porque un indicador favorable dentro de la explotación puede coexistir con costos desplazados hacia recursos comunes, otras actividades o actores sociales. Comparar sistemas exige entonces algo más que identificar la especie producida: primero es necesario precisar qué se está midiendo, durante qué periodo y dentro de qué límites.

Figura 1.

Diversidad de los sistemas pecuarios y sus principales interacciones



1.1.3. Consumo, mercados y nuevas exigencias sobre el sector pecuario

El producto pecuario que llega actualmente al mercado ya no se valora únicamente por peso, composición, inocuidad convencional y precio, porque trazabilidad, condiciones de producción, uso de medicamentos, bienestar animal, emisiones, deforestación y transparencia de la cadena empiezan a intervenir en decisiones empresariales, regulatorias y, en determinados segmentos, también en las preferencias del consumidor. La transformación no ocurre con igual intensidad en todos los países ni supone que esos atributos hayan desplazado al precio como criterio central; más bien agrega nuevas exigencias a cadenas que históricamente estuvieron organizadas alrededor de volumen, costo y calidad comercial.

La trazabilidad permite observar esa evolución con claridad. Vriezen et al. (2022), al revisar la evidencia sobre disposición a pagar por alimentos trazables, encontraron que una parte de los consumidores concede valor a la posibilidad de conocer origen, características y recorrido del producto, aunque la magnitud de esa valoración cambia según alimento, país, ingreso y diseño del sistema de

información. La existencia de consumidores interesados no implica, por ello, que todo el mercado esté dispuesto a financiar mediante un precio adicional los costos necesarios para registrar y verificar cada etapa de la cadena.

El bienestar animal presenta una situación semejante. Fonseca y Sánchez (2022) identificaron una brecha frecuente entre la preocupación declarada por el sufrimiento animal y las decisiones efectivas de compra, donde intervienen simultáneamente precio, hábitos, disponibilidad del producto, información y confianza en las etiquetas. Una encuesta que registre una actitud favorable hacia mejores condiciones de bienestar aporta información útil, aunque no puede interpretarse automáticamente como evidencia de que el consumidor aceptará cualquier incremento de precio asociado con ellas.

Parte de las nuevas exigencias tampoco procede directamente de quien compra el producto final. Empresas procesadoras, supermercados, exportadores, entidades financieras y gobiernos pueden establecer requisitos relacionados con trazabilidad, inocuidad, origen de materias primas, uso de antibióticos, certificaciones o debida diligencia ambiental; para una empresa capaz de financiar registros y controles, esas demandas pueden facilitar el acceso a mercados diferenciados, mientras que para una explotación de pequeña escala pueden representar costos adicionales difíciles de absorber.

Las diferencias regionales vuelven a ser determinantes. En mercados de mayores ingresos existe más espacio para diferenciar ciertos alimentos mediante atributos ambientales o de bienestar, pero incluso allí el comportamiento del consumidor continúa condicionado por el precio; en buena parte de América Latina, África y Asia conviven cadenas empresariales orientadas a la exportación, mercados nacionales formalizados, comercio tradicional y producción destinada al autoconsumo. La FAO (2026) muestra que precio, ingreso, disponibilidad física, comercio, cultura y entorno alimentario interactúan en las decisiones de consumo, por lo que las tendencias observadas en un mercado no deberían trasladarse automáticamente a otro.

Las nuevas demandas pueden impulsar mejoras relevantes, aunque también redistribuyen responsabilidades y costos dentro de la cadena. Cumplir un determinado estándar ambiental o de bienestar tendrá pocas posibilidades de

mantenerse si toda la inversión recae sobre un productor que no consigue recuperar ese gasto mediante precio, eficiencia o acceso a mejores mercados; la sostenibilidad empieza así a adquirir valor comercial, pero continúa siendo una cuestión económica y distributiva además de ambiental.

1.2. La dimensión ambiental de producir alimentos de origen animal

1.2.1. Emisiones, metano y contribución al cambio climático

Los sistemas pecuarios emiten distintos gases de efecto invernadero en diferentes puntos de la cadena. En los rumiantes, la fermentación entérica genera metano durante el proceso digestivo; el almacenamiento y tratamiento de estiércol puede producir metano y óxido nitroso, mientras la fertilización de pasturas y cultivos destinados a alimentación animal participa en las emisiones de N_2O . A estas fuentes se añaden el dióxido de carbono asociado al consumo energético, fabricación de insumos, transporte y procesamiento, además de las emisiones derivadas de cambios de uso del suelo cuando la expansión productiva sustituye bosques u otros ecosistemas con importantes reservas de carbono.

La estimación global depende de qué procesos se incluyan y del año utilizado. La FAO (2023b), mediante una actualización del modelo Global Livestock Environmental Assessment Model —GLEAM—, estimó para 2015 alrededor de 6,2 Gt de CO_2 equivalente anuales procedentes de los sistemas agroalimentarios pecuarios considerados en el análisis, volumen equivalente aproximadamente al 12 % de las emisiones antropogénicas globales estimadas bajo esos límites metodológicos. La cifra integra componentes de la explotación y otros procesos de la cadena, entre ellos producción de alimento, determinados cambios de uso de suelo, energía, transporte y elaboración de insumos.

Ese 12 % no debería combinarse de manera automática con el conocido 14,5 % obtenido por estimaciones anteriores de la propia FAO, porque no corresponden simplemente a dos mediciones sucesivas realizadas bajo idénticas condiciones. Cambiaron los datos de actividad, parámetros de emisión, periodos de referencia, herramientas de modelización y algunos límites utilizados; interpretar

la diferencia entre ambas cifras como evidencia directa de que las emisiones pecuarias disminuyeron sería metodológicamente injustificado.

El metano requiere además una lectura diferente de la que se aplica al dióxido de carbono. El IPCC (2021) explica que el CH₄ permanece en la atmósfera durante un tiempo mucho menor que el CO₂, aunque posee una elevada capacidad de calentamiento mientras permanece activo y ha contribuido de forma considerable al calentamiento observado. Reducir sus emisiones puede generar efectos climáticos relativamente rápidos; el dióxido de carbono, en cambio, presenta un comportamiento acumulativo, porque una parte de lo emitido permanece durante periodos mucho más prolongados.

La conversión de los distintos gases a CO₂ equivalente resulta útil para construir inventarios comparables, pero esa equivalencia métrica no vuelve idéntica su dinámica atmosférica. El horizonte temporal empleado influye especialmente sobre la forma en que se representa el efecto del metano, de manera que comparar gases solo por masa física emitida o tratarlos como cantidades intercambiables de “carbono” elimina información necesaria para interpretar correctamente su contribución climática.

También cambia la importancia de cada fuente entre especies. En bovinos y otros rumiantes, la fermentación entérica puede dominar el perfil de emisiones, mientras en aves y porcinos adquieren mayor relevancia la producción de alimento, el consumo energético y determinados sistemas de manejo de estiércol. Las medidas de mitigación deberían responder a esa estructura: una estrategia centrada en metano entérico puede ser pertinente en una cadena bovina y tener una incidencia mucho menor en una explotación avícola donde los principales impactos se generan fuera del proceso digestivo.

Tabla 2.

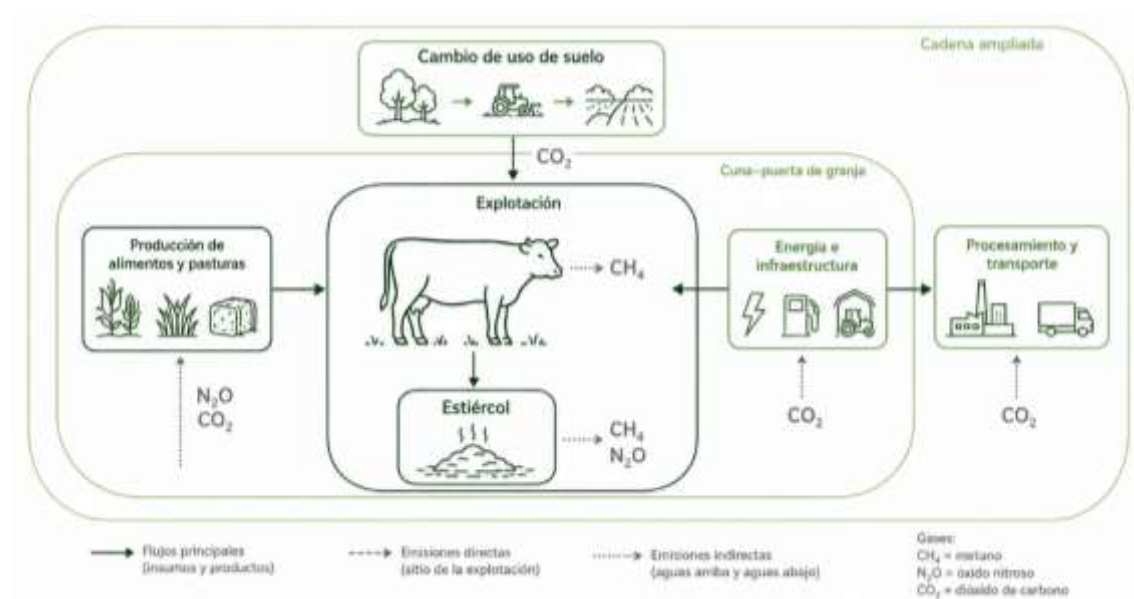
Principales fuentes de gases de efecto invernadero en los sistemas pecuarios

Fuente	Gas principal	Sistemas donde suele adquirir mayor relevancia	Interpretación
Fermentación entérica	CH ₄	Rumiantes	Depende de población animal, consumo, digestibilidad y composición de la dieta

Manejo de estiércol	CH ₄ y N ₂ O	Sistemas con almacenamiento o alta concentración de residuos	Depende de almacenamiento, temperatura y tratamiento
Fertilización y manejo de suelos	N ₂ O	Pasturas fertilizadas y producción de cultivos destinados a alimento	Vinculado al ciclo del nitrógeno
Energía e insumos	CO ₂	Sistemas con elevado consumo energético e insumos industriales	Emisiones directas e indirectas de la cadena
Cambio de uso de suelo	CO ₂ y cambios en reservas de carbono	Expansión productiva sobre ecosistemas naturales	Puede modificar sustancialmente la huella final
Producción y transporte del alimento	CO ₂ , N ₂ O y otros	Sistemas dependientes de alimento comprado	Depende del origen y composición de la ración

Figura 2.

Origen de las emisiones en una cadena pecuaria y límites posibles de evaluación



1.2.2. Suelo, agua y biodiversidad bajo presión

Una proporción considerable de la presión ambiental asociada a los sistemas pecuarios ocurre fuera del animal. Producir pasturas, forrajes y concentrados requiere tierra, nutrientes y agua; el pastoreo modifica la estructura de la vegetación y las propiedades del suelo, mientras el estiércol devuelve nutrientes y materia orgánica cuando se gestiona correctamente o se convierte en fuente

de contaminación cuando su concentración supera la capacidad de absorción del territorio.

La superficie utilizada adquiere significados distintos según sus características y alternativas de uso. Un pastizal natural localizado en una región donde los cultivos alimentarios enfrentan fuertes restricciones no puede interpretarse igual que una tierra agrícola de elevada productividad destinada a producir ingredientes para alimentación animal; Qaim et al. (2024) utilizan precisamente estas diferencias para mostrar por qué una comparación basada únicamente en hectáreas ocupadas puede perder información sobre la calidad de la tierra, competencia alimento-alimento y funciones productivas alternativas.

La presión sobre los pastizales depende de la interacción entre carga ganadera, tiempo de ocupación, recuperación de la vegetación, clima y suelo. Una utilización compatible con la capacidad del ecosistema puede mantener cobertura y productividad durante periodos prolongados, mientras la combinación de sobrepastoreo, sequía y escaso tiempo de recuperación favorece compactación, erosión y cambios en la composición vegetal; por eso tampoco resulta adecuado suponer que retirar animales constituye siempre una mejora ecológica, ya que determinados ecosistemas de pastizal mantienen parte de su estructura mediante regímenes de herbivoría y perturbación.

Los sistemas silvopastoriles representan una forma diferente de organizar esa interacción. Sales y Ferraz (2021) describen configuraciones en las que árboles, arbustos, pasturas y animales se gestionan conjuntamente, generando posibilidades de regulación microclimática, protección del suelo, diversificación de la vegetación y producción complementaria; los beneficios no aparecen de manera automática por introducir árboles, porque especie, densidad, disponibilidad de agua, manejo del pastoreo y tiempo de establecimiento determinan buena parte del resultado.

El agua ofrece un ejemplo particularmente claro de cómo una cifra puede adquirir interpretaciones muy distintas. Ran et al. (2016) revisaron los métodos utilizados para cuantificar el consumo hídrico en producción pecuaria y señalaron la dificultad de interpretar indicadores que agregan sin suficiente contexto agua verde procedente de precipitaciones, agua azul extraída de fuentes superficiales

o subterráneas y estimaciones vinculadas con contaminación. Mil litros de lluvia aprovechados por una pastura en un territorio húmedo no representan la misma presión ambiental que el mismo volumen extraído de un acuífero sometido a sobreexplotación; el lugar y el momento del consumo importan tanto como la cantidad.

El estiércol presenta una dualidad semejante, porque puede sustituir parcialmente fertilizantes minerales, devolver nutrientes y aumentar materia orgánica del suelo cuando se almacena, trata y aplica de acuerdo con las necesidades de los cultivos; cuando se concentra en superficies reducidas o se incorpora en dosis y momentos inadecuados, las pérdidas de nitrógeno y fósforo hacia agua y atmósfera pueden superar esos beneficios. La cantidad de animales explica solo una parte del riesgo, mientras almacenamiento, transporte, tratamiento y planificación agronómica determinan cómo se cierra —o se rompe— el ciclo de nutrientes.

Las relaciones con la biodiversidad dependen igualmente del contexto territorial. Expandir pasturas o cultivos forrajeros mediante la sustitución de bosques naturales puede provocar pérdidas de hábitat difíciles de compensar mediante posteriores mejoras de eficiencia; un sistema que conserva árboles, vegetación ribereña, mosaicos de hábitats y una carga compatible con el ecosistema puede desempeñar funciones muy diferentes. La etiqueta productiva vuelve a ser insuficiente: conocer que una finca produce bovinos no permite deducir, sin información adicional, cuál es su efecto sobre biodiversidad, suelo o agua.

1.2.3. Lo que muestran —y lo que no muestran— las huellas ambientales

El análisis de ciclo de vida permite seguir los impactos asociados a una producción a través de diferentes etapas y evita que una mejora observada dentro de la explotación oculte costos trasladados hacia otra parte de la cadena. En una evaluación pecuaria pueden incluirse fabricación de fertilizantes, producción de alimento, manejo animal, estiércol, energía, procesamiento y transporte; la utilidad del método reside precisamente en esa visión ampliada, aunque el resultado depende de decisiones que deben explicarse antes de utilizar cualquier cifra para comparar sistemas.

Definir dónde comienza y termina el análisis cambia el resultado. También lo modifica la forma de repartir las cargas ambientales entre leche y carne generadas por un mismo sistema, el tratamiento de los cambios de uso del suelo y la unidad funcional escogida, que puede expresarse como kilogramo de peso vivo, kilogramo de canal, litro de leche, cantidad de proteína, contenido energético o incluso valor económico. Dos estudios pueden analizar técnicamente el mismo producto y obtener resultados distintos sin que uno de ellos sea necesariamente incorrecto, simplemente porque respondieron a preguntas diferentes.

McClelland et al. (2018), en una revisión sistemática de evaluaciones de ciclo de vida aplicadas a la ganadería, encontraron una atención considerablemente mayor hacia el cambio climático que en categorías como biodiversidad, lo que limita la capacidad de algunos estudios para identificar compensaciones entre impactos. Aunque la publicación antecede al intervalo temporal prioritario de este capítulo, conserva relevancia metodológica porque evidencia una dificultad que continúa presente: reducir la evaluación ambiental a la huella de carbono puede ocultar modificaciones sobre agua, suelo, nutrientes o ecosistemas.

La distinción entre intensidad de impacto e impacto absoluto resulta especialmente importante. Una explotación que reduce de 20 a 15 unidades de CO₂ equivalente las emisiones necesarias para producir un kilogramo mejora su intensidad en un 25 %; si durante el mismo periodo duplica el volumen producido, las emisiones agregadas no necesariamente disminuyen. La eficiencia por unidad ofrece información valiosa sobre desempeño técnico, aunque no permite conocer por sí sola el efecto total de la actividad.

Mejoras en sanidad, reproducción, alimentación o crecimiento pueden reducir emisiones por unidad porque una proporción menor de recursos se pierde en animales improductivos, periodos innecesariamente prolongados o mortalidad. La FAO (2023b) incluye estas medidas entre las vías con capacidad para disminuir la intensidad de emisiones, pero su efecto sobre el total dependerá de lo que ocurra después con el tamaño del rebaño, la demanda del producto, la superficie utilizada y cualquier eventual expansión productiva.

La huella de carbono tampoco puede sustituir a la huella hídrica ni al análisis de suelo o biodiversidad. Un sistema intensivo puede necesitar menos superficie por kilogramo producido y, simultáneamente, depender de mayores cantidades de alimento externo o concentrar nutrientes en un espacio reducido; uno extensivo puede ocupar una superficie mucho mayor y hacerlo en tierras con escasas alternativas agrícolas. La sostenibilidad pierde significado cuando estas diferencias se reducen a una competencia por obtener el número más bajo dentro de un único indicador.

1.3. Producir en un clima menos predecible

1.3.1. Estrés térmico y efectos sobre los animales

Los animales generan calor como consecuencia normal de su metabolismo y mantienen su temperatura corporal mediante mecanismos de intercambio con el ambiente; mientras radiación, conducción, convección y evaporación permiten disipar esa carga térmica, el equilibrio puede conservarse, pero la combinación de temperatura elevada, humedad, radiación solar y escasa circulación de aire reduce progresivamente esa capacidad. El organismo responde entonces modificando su conducta, consumo, metabolismo y actividad fisiológica para limitar la producción interna de calor y facilitar su pérdida.

Una de las respuestas más frecuentes consiste en reducir el consumo de alimento, estrategia que disminuye parte del calor metabólico asociado con digestión y producción, aunque también limita la disponibilidad de nutrientes para crecimiento, lactancia y reproducción. El IPCC (2022) reconoce el estrés térmico como una de las vías mediante las cuales el cambio climático afecta actualmente a la producción pecuaria y anticipa un incremento de la exposición en diferentes regiones a medida que aumenten las temperaturas y cambie la frecuencia de episodios extremos.

En bovinos lecheros, Cartwright et al. (2023) describen cambios en frecuencia respiratoria, temperatura corporal, regulación endocrina, metabolismo e inmunidad asociados con el estrés por calor; las vacas de elevada producción enfrentan una dificultad particular porque su metabolismo genera una cantidad importante de calor interno, lo que puede reducir el margen disponible para

responder a condiciones ambientales adversas. La relación entre selección genética y tolerancia térmica adquiere así importancia creciente, especialmente en sistemas donde el mejoramiento se concentró durante años en maximizar rendimiento.

Los efectos reproductivos pueden persistir más allá del episodio térmico visible. Khan et al. (2023) revisan alteraciones sobre calidad de ovocitos y espermatozoides, desarrollo embrionario, expresión hormonal y fertilidad en bovinos, mostrando que parte de las consecuencias aparece días o semanas después de la exposición; una reducción reproductiva observada posteriormente puede, por ello, tener su origen en un periodo de calor que ya terminó.

La inmunidad y la integridad celular incorporan otro nivel de complejidad. Zheng et al. (2022) describen mecanismos que conectan estrés térmico, inflamación, daño oxidativo, alteraciones inmunológicas y reproducción en distintas especies pecuarias. El problema no se limita entonces a una caída puntual de producción: alimentación, metabolismo, fertilidad, salud y bienestar se modifican mediante procesos que se superponen y que pueden prolongar sus efectos.

Las especies y razas tampoco comparten un umbral térmico universal. Cerdos, aves y rumiantes presentan mecanismos distintos de disipación, mientras dentro de una misma especie influyen edad, etapa fisiológica, producción, pelaje, tamaño corporal, adaptación genética y aclimatación previa; esa variabilidad impide trasladar sin ajustes un índice, una infraestructura o una estrategia de enfriamiento de un sistema hacia otro.

1.3.2. Pasturas, disponibilidad de agua y variabilidad productiva

El cambio climático influye sobre la producción pecuaria incluso antes de que el animal experimente directamente temperaturas elevadas, porque la disponibilidad y calidad del alimento responden a precipitaciones, temperatura, humedad del suelo y duración de las estaciones. Una sequía puede reducir biomasa disponible y acelerar la maduración de las plantas, mientras una precipitación anual aparentemente cercana al promedio histórico puede generar resultados completamente distintos si se concentra en pocos episodios separados por periodos prolongados sin lluvia.

El IPCC (2022) identifica la disponibilidad de alimento y agua entre las principales vías de vulnerabilidad de los sistemas ganaderos, especialmente en producciones dependientes del pastoreo. Variaciones persistentes de precipitación pueden modificar crecimiento de pasturas, capacidad de carga y distribución espacial de recursos, mientras eventos extremos obligan a realizar ajustes sobre inventario animal, suplementación o desplazamiento del rebaño.

La degradación posterior a una sequía tampoco puede explicarse únicamente por el déficit de lluvia. Carga animal previa, profundidad del suelo, especies vegetales, reservas de biomasa, duración del pastoreo y disponibilidad de áreas de descanso determinan cuánto puede recuperar la vegetación una vez que regresan las precipitaciones; mantener durante una sequía la misma cantidad de animales que el territorio soportaba en un año favorable puede convertir una alteración temporal en un deterioro de mayor duración.

El acceso al agua para bebida se vuelve simultáneamente más crítico. Las temperaturas elevadas incrementan las necesidades de consumo y termorregulación justo cuando determinados ríos, reservorios o fuentes subterráneas pueden experimentar restricciones; en sistemas confinados existe la posibilidad de almacenar y distribuir agua mediante infraestructura, aunque una interrupción afecta rápidamente a una elevada concentración de animales, mientras en sistemas extensivos el aumento de las distancias hacia los puntos de bebida puede modificar tiempos de pastoreo y concentrar presión sobre las áreas cercanas a los abrevaderos.

Las respuestas regionales serán diferentes y no justifican un escenario uniforme de colapso productivo. Algunas zonas pueden experimentar modificaciones temporales favorables para determinadas especies vegetales o estaciones productivas, mientras otras enfrentarán restricciones considerablemente mayores; lo que pierde validez es diseñar sistemas suponiendo que la variabilidad futura repetirá necesariamente el patrón climático de las últimas décadas.

1.3.3. Adaptación de los sistemas pecuarios frente al riesgo climático

Adaptación y mitigación responden a problemas relacionados, pero no idénticos. Adaptarse implica reducir la vulnerabilidad del sistema frente a condiciones climáticas actuales o futuras; mitigar busca disminuir emisiones o aumentar remociones para limitar la magnitud del cambio climático. Algunas prácticas pueden contribuir simultáneamente a ambos objetivos, aunque su evaluación debería indicar cuál es el efecto principal y qué recursos exige.

La provisión de sombra representa una intervención directa sobre el microclima animal. Santos et al. (2022) documentaron diferencias en condiciones microclimáticas e índices de confort térmico entre distintos arreglos silvopastoriles, mientras McManus et al. (2026) analizaron el alivio de la carga térmica en vacas Gyr y Girolando bajo sistemas silvopastoriles tropicales. Estos resultados no convierten cualquier arreglo arbóreo en una solución automática, porque densidad, especie, arquitectura de copa, disponibilidad de agua y manejo del pastoreo condicionan el beneficio, pero confirman que modificar el entorno inmediato del animal puede reducir parte de la exposición térmica.

La genética aporta una estrategia de mayor horizonte temporal. Seleccionar por tolerancia térmica o utilizar cruzamientos mejor adaptados puede ayudar a mantener fertilidad y producción bajo temperaturas elevadas; Cartwright et al. (2023) señalan, sin embargo, que la termotolerancia debe evaluarse junto con otras características productivas y funcionales, porque seleccionar únicamente un rasgo puede generar compensaciones no deseadas.

En sistemas confinados, ventilación, aspersión, acceso continuo al agua, modificación de horarios de alimentación y ajustes nutricionales permiten responder con relativa rapidez a condiciones de calor. En sistemas pastoriles adquieren mayor peso el ajuste de carga, conservación de forraje, disponibilidad de reservas, restauración de pasturas, manejo de agua, diversificación y elección de razas; el IPCC (2022) incluye varias de estas opciones entre las respuestas disponibles para reducir vulnerabilidad, aunque su viabilidad depende de recursos económicos, infraestructura y capacidad institucional.

La información climática puede modificar el momento de decisión. Una previsión razonablemente confiable de déficit hídrico permite anticipar compra de alimento, ajustar carga animal, modificar fechas reproductivas o reservar agua antes de que la escasez alcance niveles críticos; la información, no obstante, solo produce adaptación cuando el productor dispone de capacidad material para actuar. Una alerta temprana tiene valor limitado para quien carece de crédito, reservas, acceso a mercados o alternativas para reducir temporalmente el número de animales.

Tabla 3.

Estrategias de adaptación climática y posibles efectos asociados

Estrategia	Riesgo principal que atiende	Posibles beneficios adicionales	Restricciones
Sombra natural o artificial	Calor y radiación	Bienestar y mantenimiento del consumo	Inversión, espacio y diseño
Ventilación y enfriamiento	Estrés térmico	Producción y reproducción	Energía y disponibilidad de agua
Selección genética	Calor y enfermedad	Resiliencia de largo plazo	Progreso gradual y posibles compensaciones
Reservas de forraje	Sequía	Estabilidad productiva	Costos de producción y almacenamiento
Ajuste de carga	Variabilidad del pastizal	Protección de cobertura vegetal	Mercado para compra y venta de animales
Sistemas silvopastoriles	Calor, degradación y variabilidad	Sombra, biodiversidad y diversificación	Tiempo de establecimiento y conocimiento técnico
Información climática	Sequías y eventos extremos	Decisiones anticipadas	Calidad del pronóstico y capacidad de respuesta
Diversificación	Variabilidad productiva	Reducción del riesgo económico	Mayor complejidad de manejo

Una estrategia robusta no pretende eliminar toda variabilidad, sino aumentar la capacidad del sistema para absorberla y recuperarse. Esa diferencia es especialmente relevante en producción pecuaria porque animales, vegetación, infraestructura y genética responden a escalas temporales distintas: modificar una dieta puede requerir horas o días, conservar reservas demanda meses, mientras establecer árboles, transformar una pastura o modificar características genéticas puede tomar años.

1.4. Sostenibilidad pecuaria: más allá de reducir emisiones

1.4.1. Productividad, rentabilidad y permanencia del productor

Una alternativa con resultados ambientales favorables que genera pérdidas económicas persistentes difícilmente puede mantenerse sin apoyo externo permanente. Reconocer esta condición no significa colocar la rentabilidad por encima del ambiente, sino admitir que la continuidad económica forma parte de la sostenibilidad y determina la posibilidad real de conservar una innovación después de terminado un proyecto, incentivo o programa de financiamiento.

La productividad interviene tanto en costos como en algunos indicadores ambientales. Un animal que enferma, muere antes de finalizar su ciclo o presenta problemas reproductivos consume alimento, agua, espacio y trabajo sin generar el producto esperado; mejorar sanidad, fertilidad, supervivencia y eficiencia alimentaria puede reducir simultáneamente pérdidas económicas y ambientales. La FAO (2023b) incorpora precisamente mejoras en productividad, alimentación, salud y manejo entre las opciones disponibles para reducir la intensidad de emisiones pecuarias.

Aun así, aumentar productividad no equivale automáticamente a aumentar rentabilidad. Una tecnología puede incrementar litros de leche, ganancia de peso o eficiencia alimentaria y no recuperar la inversión cuando el precio del producto, energía, mantenimiento o financiamiento se mueven en una dirección desfavorable; sistemas de refrigeración, sensores, automatización, aditivos o plantas de tratamiento incorporan costos que cambian según escala, infraestructura existente y condiciones de mercado.

Greenwood (2021) destaca que la eficiencia productiva debe analizarse junto con las señales económicas de la cadena, porque aumentar volumen de un producto con baja remuneración no resuelve necesariamente la viabilidad financiera. La posibilidad de capturar mejores precios por trazabilidad, calidad, bienestar o desempeño ambiental puede modificar la ecuación, aunque la evidencia revisada por Vriezen et al. (2022) muestra que esa disposición a pagar cambia considerablemente entre consumidores y mercados.

El tiempo de retorno introduce además una desigualdad que suele quedar oculta en las evaluaciones técnicas. Una empresa con capital puede asumir una inversión que tarda varios años en generar beneficios, mientras una unidad familiar con liquidez limitada puede descartar la misma tecnología aun cuando resulte rentable en el largo plazo; el problema de adopción no siempre refleja desconocimiento o resistencia, sino distintas capacidades para absorber riesgo durante el periodo de transición.

1.4.2. La dimensión social y territorial de la ganadería

Los sistemas pecuarios producen alimentos, pero también estructuran economías y territorios mediante empleo, servicios veterinarios, comercio, transporte y uso de recursos comunes. En determinados lugares, la actividad forma además parte de prácticas culturales construidas durante generaciones; estas funciones no convierten todas las formas de producción en deseables, aunque sí obligan a considerar consecuencias que desaparecen cuando la evaluación se reduce a emisiones por kilogramo.

Alary et al. (2022) proponen analizar la sostenibilidad de los sistemas pecuarios de zonas secas conectando rebaño, hogar, mercado, territorio y recursos naturales, enfoque que permite observar contradicciones imposibles de detectar desde una sola escala. Una finca puede mejorar sus ingresos mientras aumenta la presión sobre un pastizal compartido; un territorio puede conservar determinadas áreas a costa de excluir a productores con escasa capacidad de negociación, o una tecnología aumentar productividad mientras incrementa la dependencia financiera de la unidad productiva.

El conocimiento local cobra valor porque buena parte de las decisiones ganaderas se adopta bajo condiciones de incertidumbre. Identificar rutas de pastoreo, épocas recurrentes de déficit forrajero, fuentes temporales de agua, comportamiento de razas locales o señales tempranas de deterioro del terreno puede complementar información científica y herramientas de monitoreo; reconocer ese conocimiento no exige idealizarlo, ya que algunas prácticas pierden funcionalidad cuando cambian clima, densidad poblacional, acceso a tierra o mercados.

La tecnificación merece una lectura igualmente equilibrada. Sensores, registros digitales, nutrición de precisión, automatización y nuevas herramientas genéticas pueden solucionar problemas concretos y mejorar el control de la producción, pero requieren capital, conectividad, mantenimiento, capacitación y acceso estable a servicios; cuando estas condiciones no existen, una tecnología ambientalmente prometedora puede ampliar la distancia entre productores capaces de adoptarla y aquellos que quedan fuera del nuevo estándar productivo.

Tenencia de tierra, disponibilidad de agua, crédito y poder de negociación terminan influyendo sobre la capacidad de transformación tanto como la calidad técnica de una intervención. Un productor con acceso seguro a pastizales puede reducir temporalmente la carga o invertir en restauración, mientras otro que opera bajo condiciones precarias enfrenta incentivos diferentes; atribuir estas respuestas exclusivamente a una supuesta falta de conciencia ambiental confunde restricciones estructurales con decisiones voluntarias.

1.4.3. Tensiones entre eficiencia, ambiente y bienestar animal

Existen prácticas capaces de generar beneficios simultáneos para productividad, ambiente y bienestar. Mejorar salud reduce mortalidad y pérdidas de alimento, mientras una interacción humano-animal adecuada disminuye miedo y facilita manejo; Orihuela (2021) revisa diferentes aplicaciones del conocimiento sobre comportamiento animal que pueden contribuir tanto a condiciones de bienestar como a un desempeño productivo más estable.

Las relaciones se vuelven menos lineales cuando se maximiza un único indicador. Seleccionar animales para rendimientos elevados puede disminuir las emisiones por kilogramo si el aumento de producto supera el incremento de recursos utilizados, pero esa mayor productividad puede acompañarse de una elevada demanda metabólica y aumentar la sensibilidad al estrés térmico u otros trastornos cuando genética, alimentación y manejo no evolucionan de forma coordinada.

El confinamiento muestra otra tensión habitual. Permite controlar dieta, sanidad, temperatura e interacciones entre animales, y puede disminuir la superficie directamente utilizada por unidad de producto; instalaciones mal diseñadas o

densidades excesivas pueden, sin embargo, restringir movimiento y conductas importantes. El sistema extensivo tampoco constituye automáticamente el extremo favorable, porque animales mantenidos al aire libre pueden sufrir calor, frío, parasitismo, depredación o periodos de alimentación insuficiente.

Los sistemas silvopastoriles ofrecen una zona potencial de convergencia al proporcionar sombra, modificar el microclima, introducir diversidad estructural y contribuir a determinadas funciones del suelo. Sales y Ferraz (2021) describen estas posibilidades, mientras Santos et al. (2022) aportan evidencia sobre cambios microclimáticos y confort térmico; la inversión inicial, el tiempo requerido para el establecimiento y la competencia entre componentes vegetales impiden, sin embargo, tratarlos como una solución sin costos.

La eficiencia climática plantea un dilema semejante. Disminuir emisiones por kilogramo puede favorecer sistemas altamente productivos, mientras algunos criterios de bienestar pueden demandar menor densidad, ciclos productivos diferentes o mayor disponibilidad de espacio. Ningún indicador resuelve por sí solo esa tensión; una evaluación rigurosa debería hacer visible qué mejora, qué empeora y quién asume los costos de cada decisión.

Figura 3.

Mapa de sinergias y tensiones en la sostenibilidad pecuaria



1.5. ¿Qué tendría que cambiar?

1.5.1. Del diagnóstico ambiental a la transformación del sistema

Una parte del diagnóstico cuenta con evidencia suficientemente consolidada para orientar decisiones. Los rumiantes producen metano mediante fermentación entérica, el manejo de estiércol puede generar CH₄ y N₂O, la producción de alimento utiliza tierra y nutrientes, mientras el estrés térmico compromete producción, reproducción, salud y bienestar; existe también evidencia consistente de que genética, alimentación, sanidad, manejo de pasturas y tratamiento de residuos modifican sustancialmente el desempeño de los sistemas.

La dificultad comienza cuando esas conclusiones generales se convierten en recomendaciones universales. Reducir intensidad de emisiones no garantiza una disminución de las emisiones absolutas; confinar animales puede mejorar determinados indicadores de eficiencia y empeorar aspectos de bienestar cuando las instalaciones no responden a sus necesidades, mientras ampliar el pastoreo puede aprovechar recursos con pocas alternativas agrícolas o acelerar procesos de degradación cuando la carga supera la capacidad del ecosistema. Introducir árboles aporta beneficios en determinadas configuraciones, pero tampoco asegura automáticamente un mejor resultado si las especies, densidades y condiciones hídricas son inadecuadas.

La FAO (2023b) identifica mejoras en productividad, genética, salud, alimentación y manejo entre las principales vías disponibles para disminuir emisiones pecuarias y, al mismo tiempo, reconoce que su aplicación debe ajustarse a sistemas y contextos diferentes. El problema deja entonces de ser la ausencia de alternativas y pasa a centrarse en determinar cuál de ellas responde al principal cuello de botella de cada producción, cuánto cuesta adoptarla y qué efectos aparecen cuando deja de utilizarse de manera experimental y se incorpora a gran escala.

El animal tampoco debería analizarse de forma aislada. Una vaca más eficiente puede producir más utilizando proporcionalmente menos recursos, pero la huella

de su producto continúa dependiendo del origen del alimento, la energía, el estiércol, el transporte y el uso del suelo; una explotación puede reducir parte de sus impactos internos mientras desplaza la producción de alimento o determinados costos ambientales hacia otra región. Del mismo modo, una tecnología técnicamente eficiente puede modificar la estructura económica de la actividad cuando solo determinados productores poseen capacidad para financiarla.

Definir correctamente el problema debería preceder a la elección de la solución. Cuando las mayores pérdidas provienen de mortalidad o enfermedad, mejorar salud puede producir resultados ambientales y económicos superiores a introducir una tecnología específicamente diseñada para reducir emisiones; si la limitación principal es el estrés térmico, sombra, agua y diseño de instalaciones pueden generar un beneficio mayor que intervenciones dirigidas a otro componente de la cadena. En una región donde la degradación del suelo representa la amenaza dominante, la reorganización del pastoreo y la recuperación de cobertura pueden adquirir prioridad sobre el aumento inmediato de productividad.

La transformación tampoco equivale necesariamente a una intensificación continua. Mejorar eficiencia puede reducir los recursos requeridos para obtener una cantidad determinada de alimento y disminuir el número de animales necesarios para mantener un nivel de producción, aunque también puede estimular una expansión cuando mayores márgenes y demanda creciente favorecen el aumento del volumen total; políticas territoriales, comportamiento del mercado y decisiones sobre uso de suelo determinarán cuál de esos efectos termina predominando.

1.5.2. Decisiones distintas para territorios y productores distintos

Una explotación lechera periurbana, un sistema de alpacas en los Andes, una unidad bovina de doble propósito en una zona tropical, una producción ovina de secano y una explotación avícola intensiva enfrentan restricciones tan diferentes que aplicarles una misma receta de sostenibilidad tendría escaso fundamento. Altitud, precipitación, temperatura, disponibilidad de tierra, tipo de alimento,

distancia al mercado, tamaño de finca, acceso a crédito y capacidad tecnológica modifican qué alternativas pueden funcionar y cuáles generan costos difíciles de asumir.

Alary et al. (2022) convierten esta diversidad en una cuestión metodológica al mostrar que los indicadores deben interpretarse según escalas espaciales, temporales y sociales; el mismo principio resulta útil para seleccionar intervenciones, porque primero se necesitan conocer las funciones y restricciones del sistema y solo después comparar las alternativas disponibles.

Para un pequeño productor, una práctica relativamente sencilla que disminuya mortalidad, conserve forraje durante la estación seca o mejore el acceso al agua puede tener mayor impacto que una herramienta digital compleja. En explotaciones intensivas, sensores, control ambiental, automatización o tratamiento avanzado de residuos pueden justificarse debido a la escala y al grado de concentración de los procesos; en sistemas pastoriles, movilidad, flexibilidad de carga, restauración de pastizales y gobernanza de recursos comunes pueden resultar mucho más decisivos.

Las políticas públicas condicionarán buena parte de esas posibilidades mediante crédito, seguros, investigación, extensión, infraestructura, formación, regulación y acceso a información. Una exigencia ambiental que supone idéntica inversión para todas las explotaciones puede representar un ajuste manejable para una empresa de gran escala y una barrera para una unidad familiar; evaluar desempeño ambiental exige entonces considerar también cómo se distribuyen los costos necesarios para alcanzarlo.

La evidencia revisada tampoco respalda una oposición rígida entre innovación tecnológica y conocimiento tradicional. Los sistemas capaces de responder a escenarios ambientales y económicos más exigentes probablemente combinarán genética, nutrición, monitoreo, información climática y nuevas herramientas de gestión con conocimientos territoriales, diversidad biológica y prácticas adaptadas a recursos locales; la proporción entre estos elementos cambiará según el sistema, y ninguna combinación tendrá el mismo valor en todos los territorios.

El cambio necesario puede entenderse mejor como una modificación de los criterios utilizados para decidir. Ya no basta con conocer cuánto produce un animal o cuánto cuesta obtener un kilogramo de alimento; también se necesita comprender qué recursos utiliza la cadena, qué emisiones genera, qué vulnerabilidad climática enfrenta, qué condiciones experimentan los animales, qué margen económico permanece para el productor y qué funciones cumple la actividad dentro del territorio. Ninguna de esas preguntas debería utilizarse para silenciar a las demás.

Los sistemas pecuarios se encuentran así ante un problema de rediseño más que frente a una simple sustitución tecnológica: algunas explotaciones tendrán que utilizar menos insumos, otras reducir pérdidas, reorganizar el pastoreo, mejorar el manejo de estiércol o proteger a los animales del calor; ciertas cadenas podrán incorporar tecnologías avanzadas, mientras otras necesitarán recuperar flexibilidad y fortalecer recursos locales. En determinados territorios será necesario modificar especies, escalas, dietas o formas de integración entre agricultura y ganadería. Una vez reconocida esa diversidad, el debate deja el terreno del diagnóstico y se concentra en la cuestión que realmente condicionará la transición: ¿cómo transformar la manera de producir?

Capítulo II. Repensar la producción: eficiencia, resiliencia y aprovechamiento de los recursos

Repensar la producción: eficiencia, resiliencia y aprovechamiento de los recursos

La sostenibilidad de una explotación pecuaria no depende únicamente de cuánto produce, sino de la relación entre esa producción y los recursos que necesita para sostenerla. Dos sistemas capaces de generar una cantidad semejante de leche, carne o huevos pueden mostrar diferencias considerables en consumo de alimento, uso de tierra y agua, pérdidas de nitrógeno, generación de estiércol, emisiones por unidad de producto y costos operativos. El margen de mejora se encuentra, precisamente, en esas diferencias. Repensar la producción significa identificar dónde se pierden nutrientes, energía, biomasa y dinero, y decidir qué cambios son técnicamente posibles antes de aumentar animales, superficie o insumos.

La eficiencia tampoco equivale a una intensificación indiscriminada. Un animal con mayor rendimiento absoluto puede utilizar con eficiencia parte de sus requerimientos de mantenimiento, pero esa ventaja desaparece si depende de dietas costosas, ambientes fuertemente controlados o insumos que el productor no puede sostener. Lo mismo ocurre con determinadas tecnologías ambientales: una reducción experimental del metano tiene poco valor práctico cuando exige una administración continua imposible en pastoreo extensivo, mientras que un biodigestor diseñado para una gran explotación confinada difícilmente conserva su rentabilidad al trasladarse sin ajustes a una unidad familiar con volúmenes pequeños y discontinuos de estiércol. La pregunta productiva, por tanto, no es cuál tecnología parece más innovadora, sino cuál resuelve una limitación concreta sin desplazar el problema hacia otro componente del sistema.

2.1. Alimentar mejor antes que simplemente producir más

2.1.1. Nutrición de precisión y eficiencia en el uso de nutrientes

El alimento suele representar una de las partidas económicas más importantes de la producción animal y, al mismo tiempo, constituye una vía decisiva de entrada de nitrógeno, fósforo, carbono y energía al sistema. Cuando la ración aporta menos nutrientes de los requeridos, aparecen restricciones productivas, pérdida de condición corporal, alteraciones reproductivas o problemas sanitarios;

cuando los aporta sistemáticamente por encima de las necesidades, el excedente no desaparece, sino que termina principalmente en heces, orina, calor metabólico o emisiones. La formulación moderna intenta trabajar en el estrecho espacio existente entre ambas situaciones.

Para bovinos lecheros, la octava edición de *Nutrient Requirements of Dairy Cattle* actualizó la estimación del consumo de materia seca y de las necesidades de energía, proteína, minerales y vitaminas mediante modelos que consideran producción, peso corporal, estado fisiológico, composición de la dieta y condiciones ambientales. El aporte de este enfoque no consiste en memorizar un requerimiento promedio, sino en reconocer que la necesidad nutricional varía entre animales y a lo largo del ciclo productivo. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021) muestra precisamente por qué formular para una “vaca promedio” puede generar simultáneamente deficiencias en parte del lote y excesos en otra.

La nutrición de precisión lleva esta lógica un paso más allá. Zuidhof (2020) la describe como el intento de ajustar la oferta de nutrientes a los requerimientos del animal con una resolución mucho mayor que la empleada por los programas tradicionales de alimentación. En aves, donde grandes poblaciones relativamente homogéneas permiten controlar consumo, crecimiento y conversión con bastante detalle, los programas multifase y la alimentación de precisión reducen el periodo durante el cual una dieta se encuentra por encima o por debajo de las necesidades reales. En porcinos, la posibilidad de estimar peso y trayectoria de crecimiento y combinar mezclas con distinta densidad nutricional permite aproximarse diariamente a los requerimientos de grupos pequeños o incluso de individuos.

La utilidad ambiental surge porque proteína y fósforo dejan de administrarse con márgenes de seguridad excesivamente amplios. Monteiro et al. (2021) relacionaron características de eficiencia y excreción en cerdos con los impactos ambientales de la producción, mostrando que el desempeño productivo no puede separarse de la cantidad de nutrientes que entra y sale de la explotación. Reducir proteína bruta manteniendo un perfil adecuado de aminoácidos digestibles, por ejemplo, puede disminuir la entrada de nitrógeno sin convertir la

reducción de proteína en una restricción del crecimiento. El principio es sencillo; ejecutarlo correctamente exige información sobre composición de ingredientes, consumo real y requerimientos, además de capacidad para corregir la dieta cuando alguno de esos elementos cambia.

En rumiantes el problema es diferente porque la dieta alimenta primero a una comunidad microbiana y solo después, mediante proteína microbiana, ácidos grasos volátiles y nutrientes que escapan de la degradación ruminal, al propio animal. Una reducción indiscriminada de proteína puede disminuir pérdidas de nitrógeno, pero también limitar la fermentación si la disponibilidad de nitrógeno degradable deja de acompañar el aporte de energía fermentable. Algo semejante ocurre cuando se intenta elevar la densidad energética con concentrados: la conversión puede mejorar en determinadas circunstancias, aunque una modificación excesiva de la relación forraje-concentrado altera la fermentación, aumenta el riesgo de trastornos digestivos y hace al sistema más dependiente de ingredientes externos.

En bovinos y pequeños rumiantes mantenidos principalmente a pastoreo, la precisión tampoco debe imaginarse como una ración completamente controlada. Su forma práctica puede consistir en conocer la calidad del forraje, separar grupos según necesidades, ajustar el suplemento a la estación, evitar la suplementación proteica cuando el pasto ya cubre el requerimiento o reservar los alimentos de mayor calidad para las categorías fisiológicamente más demandantes. Una balanza, un análisis bromatológico periódico y registros confiables pueden generar más eficiencia que una plataforma digital sofisticada alimentada con datos deficientes.

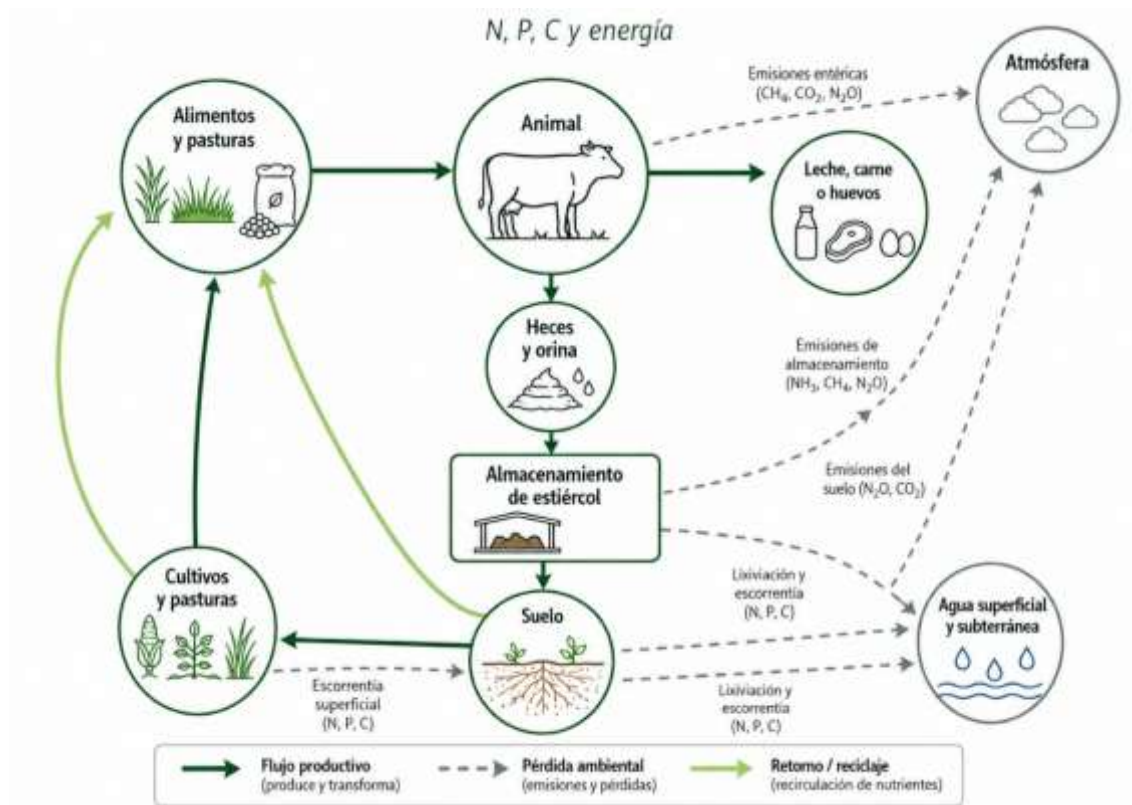
La conversión alimenticia merece una lectura igualmente cuidadosa. En pollos o cerdos, donde es relativamente sencillo relacionar alimento ingerido con ganancia de peso, constituye un indicador operativo muy potente; en vacas lecheras interesa además la producción corregida por energía, la movilización de reservas corporales y la etapa de lactancia, mientras que en sistemas pastoriles la estimación del consumo introduce mayor incertidumbre. Comparar especies o explotaciones mediante un solo cociente puede ocultar diferencias en la digestibilidad del alimento, el uso de coproductos no comestibles por seres

humanos y el aprovechamiento de superficies incapaces de producir cultivos destinados directamente a la alimentación humana.

La nutrición de precisión, por tanto, no promete que todo animal reciba exactamente lo que necesita a cada instante. Su contribución real es más modesta y, precisamente por ello, más útil: reducir la distancia entre una oferta nutricional basada en promedios amplios y los requerimientos de animales que cambian con edad, producción, clima y estado fisiológico. Cuanto más costoso sea medir esos cambios, más importante será decidir hasta qué nivel de precisión tiene sentido llegar.

Figura 4.

Flujo de nutrientes y puntos de pérdida dentro de una explotación pecuaria



2.1.2. Recursos alimentarios locales y materias primas alternativas

La búsqueda de ingredientes alternativos suele intensificarse cuando aumenta el precio del maíz, la soja u otras materias primas convencionales, aunque

reducir costos no es la única razón para hacerlo. También puede disminuirse la competencia entre alimentos destinados a personas y animales, utilizar biomasa disponible cerca de la explotación y diversificar fuentes de proteína o energía. El atractivo ambiental de una materia prima alternativa depende, sin embargo, de qué reemplaza, de dónde proviene y de cuánto procesamiento necesita antes de llegar al comedero.

Alimi et al. (2024) encontraron una amplia variedad de recursos utilizados para enfrentar periodos de escasez en sistemas de rumiantes de África occidental. La importancia del trabajo trasciende esa región: demuestra que los recursos alternativos adquieren valor cuando responden a una restricción estacional concreta y cuando pueden integrarse con el conocimiento local, pero su composición y disponibilidad rara vez son tan uniformes como las de un ingrediente comercial estandarizado. Una hoja arbórea, un residuo de cosecha o un forraje tolerante a sequía puede sostener animales durante una estación crítica sin convertirse por ello en sustituto universal de los alimentos convencionales.

En sistemas tropicales y latinoamericanos existe una extensa diversidad de residuos de cosecha, pulpas, salvados, tortas de oleaginosas, melazas, descartes hortofrutícolas y biomasa forrajera. La proximidad ofrece una ventaja obvia: aquello que se produce dentro de la finca o en una agroindustria vecina evita parte del transporte y puede tener un costo de oportunidad bajo. Esa ventaja desaparece cuando el material contiene demasiada humedad, se deteriora con rapidez, necesita secado intensivo o debe desplazarse largas distancias. La denominación “local” no garantiza sostenibilidad; solo describe una relación espacial que necesita ser evaluada económicamente.

Chisoro et al. (2023) destacan el papel de recursos alimentarios novedosos dentro de estrategias de economía circular, pero también la necesidad de caracterizar su valor nutricional y asegurar su utilización. Una explotación puede tener abundancia de un coproducto fibroso y seguir padeciendo déficit proteico; otra puede disponer de una fuente energética económica cuyo contenido de humedad hace imposible almacenarla durante varios meses. La formulación debe partir del nutriente que falta y no de la mera disponibilidad de biomasa.

Las harinas de insectos ilustran bien la diferencia entre posibilidad biológica y adopción comercial. Elahi et al. (2022) revisaron su utilización en alimentación aviar y documentaron su potencial como fuente de proteína y lípidos, pero también variaciones asociadas con especie, estadio de desarrollo, sustrato de cría, procesamiento y contenido de quitina. El hecho de que un pollo pueda utilizar satisfactoriamente una harina de insecto en un ensayo no significa que esta pueda reemplazar económicamente a la soya en cualquier mercado. Producción a escala, precio, inocuidad, regulación y constancia de suministro siguen determinando qué parte de esa evidencia puede trasladarse a una formulación comercial.

Tabla 4.

Recursos alimentarios alternativos: potencial productivo y condiciones para su utilización

Recurso	Oportunidad principal	Limitaciones que deben evaluarse	Nivel de madurez
Coproductos de cereales, oleaginosas y agroindustrias	Sustituir parcialmente cultivos producidos específicamente para alimentación animal y valorizar biomasa existente	Variación de composición, humedad, micotoxinas o contaminantes, transporte y competencia con otros usos	Comercial en numerosos sistemas, condicionado por disponibilidad regional. Govoni et al. (2023)
Residuos de cosecha y recursos forrajeros locales	Cubrir periodos de déficit y reducir dependencia de alimentos comprados	Baja digestibilidad en algunos materiales, estacionalidad, conservación y necesidad de suplementación complementaria	Uso extendido localmente, pero con resultados muy dependientes del sistema. Alimi et al. (2024)
Pulpas, bagazos y otros residuos húmedos	Fuente regional de energía o fibra y reducción de residuos agroindustriales	Alta humedad, fermentación no controlada, vida útil corta y costo de transporte	Comercial cuando existe proximidad entre industria y explotación. Chisoro et al. (2023)
Harinas de insectos	Fuente de proteína y lípidos; posibilidad de integrar ciertos flujos secundarios	Costo, regulación, variabilidad, sustrato de cría, procesamiento y quitina	Evidencia experimental sólida en varias especies; adopción comercial todavía selectiva. Elahi et al. (2022)

2.1.3. Subproductos agroindustriales y nuevas fuentes de alimentación

Los subproductos adquieren especial interés porque su utilización puede resolver dos problemas simultáneos: aportar nutrientes y evitar que biomasa potencialmente útil termine tratada como residuo. Govoni et al. (2023) modelaron a escala global la sustitución de cultivos utilizados como alimento animal por subproductos agrícolas y encontraron un importante potencial para reducir presión sobre tierra y agua. El resultado no debe interpretarse como una invitación a incorporar cualquier residuo a una dieta, sino como evidencia de que parte de los flujos que ya genera la agricultura podría aprovecharse con mayor eficiencia.

La primera dificultad es la composición. Un ingrediente convencional comprado bajo especificaciones técnicas tiende a mostrar menor incertidumbre que un subproducto cuya composición cambia según variedad vegetal, proceso industrial, extracción previa de nutrientes o temporada. Cuando esa variación no se mide, el nutricionista puede formular una dieta matemáticamente correcta con valores que no describen el lote realmente suministrado.

La conservación introduce otra frontera. Los materiales húmedos pueden ser excelentes ingredientes cerca del punto de generación y convertirse en un problema pocos días después si no existe ensilado, refrigeración, acidificación u otra estrategia apropiada. Secarlos facilita almacenamiento y transporte, pero incorpora energía y capital al proceso. La alternativa ambientalmente atractiva en papel empieza entonces a acumular costos que deben compararse con el ingrediente reemplazado.

También existen límites sanitarios. Micotoxinas, residuos químicos, cuerpos extraños, exceso de determinados minerales o compuestos antinutricionales obligan a establecer criterios de recepción y análisis; un precio muy bajo no compensa el riesgo de introducir un contaminante en una cadena de leche, carne o huevos. El uso seguro de coproductos requiere trazabilidad suficiente para conocer de qué proceso proceden y qué cambios industriales podrían alterar su composición.

La competencia por otros usos tampoco es trivial. Algunos materiales denominados “residuos” tienen valor como fertilizantes, sustratos, combustibles o materias primas industriales. Cuando una nueva demanda aumenta su precio, la ventaja inicial para el ganadero disminuye y puede aparecer una competencia que el análisis ambiental original no había considerado. La bioeconomía funciona mejor cuando identifica flujos realmente infrautilizados que cuando simplemente cambia de comprador un recurso que ya tenía destino.

2.2. El desafío del metano y otras pérdidas del sistema

2.2.1. ¿De dónde proceden las emisiones dentro de una explotación pecuaria?

Las emisiones de una explotación no salen de un único punto. En bovinos y pequeños rumiantes, la fermentación entérica convierte carbohidratos del alimento en ácidos grasos volátiles que el animal utiliza como fuente de energía; durante ese proceso se genera hidrógeno y la producción de metano por arqueas metanogénicas actúa como una vía de eliminación de ese hidrógeno. El metano exhalado representa carbono que entró con el alimento y no terminó en producto animal.

La magnitud de esa pérdida depende de consumo, digestibilidad y fermentación ruminal, razón por la cual no basta con contar animales. Una dieta más digestible puede aumentar consumo y producción y, al mismo tiempo, modificar las emisiones expresadas por kilogramo de leche o carne. Reducir intensidad de emisión y reducir emisiones absolutas son objetivos relacionados, pero no equivalentes.

Después del animal aparece el estiércol. Las condiciones anaerobias de sistemas líquidos favorecen la generación de metano durante almacenamiento, mientras que los procesos de nitrificación y desnitrificación pueden originar óxido nítrico durante almacenamiento, tratamiento o aplicación al suelo. Las pérdidas de amoníaco, aunque el NH_3 no sea un gas de efecto invernadero, representan nitrógeno que deja de estar disponible como fertilizante y puede contribuir posteriormente a emisiones indirectas. Yan et al. (2024) insisten en que la mitigación debe analizar conjuntamente alojamiento, almacenamiento,

tratamiento y aplicación porque una práctica favorable para un gas puede empeorar otro.

En cerdos y aves la fermentación entérica tiene un peso mucho menor que en rumiantes, de modo que alimentación, manejo del estiércol, energía y producción de ingredientes adquieren una relevancia proporcionalmente mayor. Esta diferencia entre especies explica por qué una estrategia centrada en inhibidores ruminales tiene sentido para bovinos y carece de aplicación equivalente en pollos; la eficiencia alimentaria y la gestión de nutrientes, en cambio, atraviesan prácticamente todos los sistemas.

La fertilización completa el circuito. El nitrógeno aplicado en forma mineral o como estiércol puede transformarse, ser absorbido por las plantas, volatilizarse, lixiviarse o emitirse como N_2O . El manejo del suelo deja entonces de ser una cuestión externa a la producción pecuaria, especialmente cuando la explotación produce su propio forraje. Una dieta sobredimensionada en proteína puede terminar incrementando el nitrógeno urinario, trasladando hacia el suelo un desequilibrio que comenzó en el comedero.

2.2.2. Estrategias nutricionales para disminuir el metano entérico

No todas las estrategias antimetanogénicas actúan en el mismo sitio ni ofrecen la misma consistencia. Cambiar la calidad del forraje modifica la fermentación completa; agregar lípidos altera tanto la disponibilidad de sustrato como ciertas poblaciones microbianas; los nitratos funcionan como aceptores alternativos de hidrógeno; el 3-nitrooxipropanol —3-NOP— inhibe una enzima involucrada en la etapa final de la metanogénesis. Juzgarlas únicamente por el porcentaje máximo de reducción observado conduce a decisiones poco realistas.

El 3-NOP dispone de una de las bases experimentales más consistentes entre los aditivos recientes. A partir de estudios con vacas lecheras, Hristov et al. (2022) señalaron reducciones aproximadas de 28–32 % en producción, rendimiento e intensidad de metano en el conjunto meta-analítico que analizaron, sin una disminución general de la producción de leche. Kebreab et al. (2023) confirmaron posteriormente que la respuesta depende de la dosis y de

características de la dieta, lo que impide tratar el aditivo como un efecto fijo independiente del sistema.

Una dificultad práctica es que el compuesto necesita llegar regularmente al rumen. Esa condición resulta relativamente sencilla en animales que reciben una ración mezclada diariamente y mucho menos cómoda en bovinos que pasan gran parte de la jornada en potreros extensos. Martins et al. (2024), al analizar 218 estudios sobre estrategias de mitigación en vacas lecheras, observaron que dosis, composición nutricional y duración de la suplementación explican parte de la variación de las respuestas. La eficacia biológica del producto y la arquitectura del sistema de alimentación son, por tanto, dos problemas distintos.

Asparagopsis representa el caso más llamativo por la magnitud potencial de su efecto. Roque et al. (2021) registraron reducciones superiores al 80 % de metano entérico con la inclusión más alta evaluada en novillos de carne bajo condiciones controladas. Sería incorrecto convertir ese resultado en un valor esperado para cualquier bovino: el ensayo utilizó animales, dosis y un régimen de alimentación específicos, mientras que producción constante del alga, concentración de compuestos activos, suministro diario, aceptación, estabilidad y evaluación a largo plazo siguen siendo aspectos decisivos para una adopción amplia.

Los nitratos tienen un mecanismo diferente. Al actuar como sumidero alternativo de hidrógeno pueden reducir metano, aunque su administración exige una adaptación cuidadosa por el riesgo de acumulación de nitrito y alteraciones compatibles con metahemoglobinemia si se utilizan incorrectamente. Hristov et al. (2022) consideran que existe evidencia de eficacia, pero también una frontera de seguridad que impide tratarlos como un suplemento de uso libre. La dieta basal, la dosis, el periodo de adaptación y la supervisión técnica forman parte de la intervención, no son condiciones accesorias.

Los lípidos muestran una respuesta relativamente consistente cuando reemplazan parte de los carbohidratos fermentables y afectan microorganismos ruminales, pero elevarlos indefinidamente no produce beneficios indefinidos. Una concentración excesiva puede reducir digestión de fibra, consumo o componentes de la leche. Martins et al. (2024) encontraron que la dosis y la composición de la dieta modifican la eficacia de esta estrategia; la reducción de

metano debe compararse, por ello, con cualquier pérdida de digestibilidad o producción.

Los taninos condensados y otros metabolitos vegetales presentan una respuesta más variable. Parte de la heterogeneidad proviene de que “taninos” engloba estructuras químicas, plantas y concentraciones diferentes. En algunas condiciones pueden reducir metano o modificar utilización de proteína; en otras, el efecto es pequeño y una concentración alta perjudica digestibilidad y consumo. La revisión meta-analítica de Martins et al. no respalda la idea de que todos los compuestos secundarios vegetales generen reducciones grandes y persistentes.

La calidad del forraje merece una posición distinta porque no consiste en “añadir” un mitigante. Vargas et al. (2022) muestran que en sistemas de pastoreo la digestibilidad, madurez, composición botánica, disponibilidad y manejo del forraje condicionan la producción de metano y, sobre todo, la intensidad de emisión. Pasturas muy maduras y fibrosas prolongan la permanencia del material en el rumen y favorecen patrones de fermentación diferentes de los observados con forrajes jóvenes y digestibles. Mejorar la dieta puede elevar la productividad más rápidamente que reducir las emisiones absolutas; por eso ambos indicadores deben reportarse por separado.

Tabla 5.

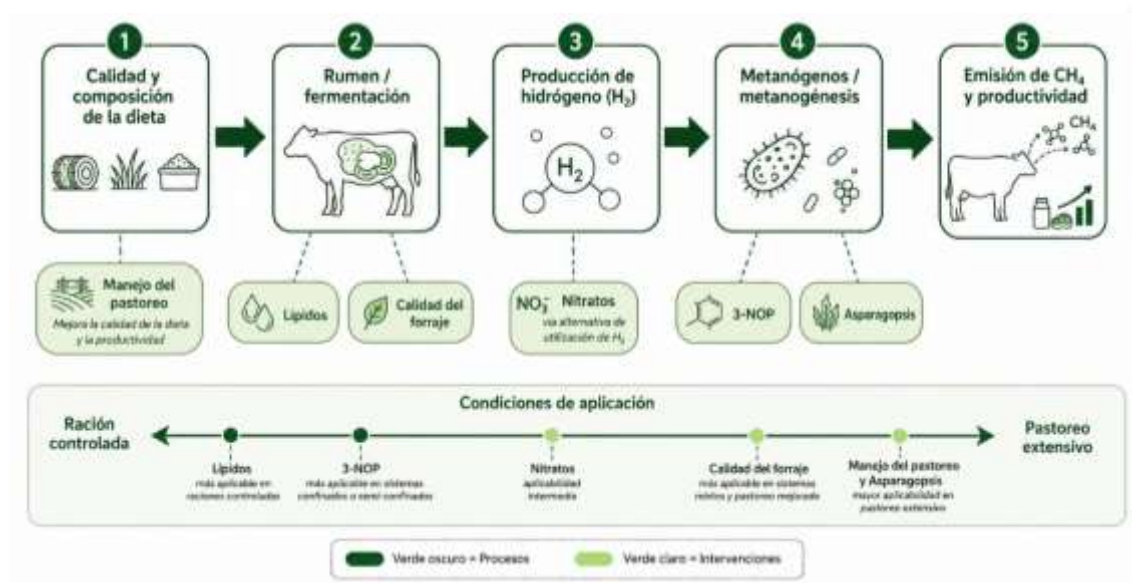
Principales estrategias nutricionales para reducir metano entérico y límites de aplicación

Estrategia	Efecto respaldado por la evidencia	Consistencia y duración	Limitaciones principales	Condiciones de aplicación
3-NOP	Meta-análisis en vacas lecheras: reducción cercana a 28– 32 % según indicador y condiciones	Evidencia relativamente consistente; respuesta modulada por dosis, dieta y tiempo	Costo, necesidad de suministro frecuente y menor facilidad en pastoreo extensivo	Especialmente compatible con sistemas donde la ración se administra diariamente. Hristov et al. (2022); Kebreab et al. (2023)

Asparagopsis spp.	Reducciones >80 % observadas en un ensayo controlado con novillos a la mayor inclusión estudiada	Efecto potencialmente muy alto, pero no debe extrapolarse automáticamente fuera de las condiciones estudiadas	Producción del alga, concentración del principio activo, estabilidad, suministro y evaluación de largo plazo	Mayor control en sistemas de alimentación confinada. Roque et al. (2021)
	Reducción de metano respaldada en literatura experimental	Respuesta dependiente de dosis y dieta	Riesgo asociado a nitrito/metahemoglobinemia si el manejo es incorrecto	Adaptación progresiva y formulación técnicamente controlada. Hristov et al. (2022)
Lípidos	Reducción de metano en diferentes estudios y meta-análisis	Efecto dependiente de dosis y composición de la dieta	Excesos pueden reducir consumo, digestión de fibra o componentes productivos	Deben integrarse a la formulación total, no añadirse aisladamente. Martins et al. (2024)
Taninos y otros compuestos vegetales	Respuesta variable, desde efectos pequeños hasta reducciones bajo condiciones específicas	Menos consistente entre fuentes vegetales	Digestibilidad, palatabilidad, composición química y dosis	Requieren caracterización del producto y evidencia específica, no extrapolación por categoría. Martins et al. (2024)
Manejo y calidad del forraje	Puede mejorar digestibilidad y disminuir intensidad de emisión	Depende marcadamente del clima, especie forrajera y estado de madurez	Disponibilidad estacional, carga animal y control más limitado del consumo	Especialmente relevante en sistemas pastoriles. Vargas et al. (2022)

Figura 5.

Estrategias de mitigación del metano según el punto de intervención



2.2.3. Mitigar sin trasladar el problema: límites y efectos no deseados

Una intervención deja de ser sostenible cuando el indicador que mejora es demasiado estrecho para mostrar el costo de esa mejora. Sustituir un ingrediente puede reducir metano entérico y aumentar las emisiones asociadas a su fabricación; modificar el manejo del estiércol puede disminuir CH_4 y elevar pérdidas de nitrógeno; incrementar concentrado puede reducir metano por kilogramo de producto y aumentar dependencia de cultivos, energía o tierra externa a la explotación. La frontera pertinente es el sistema completo.

El análisis de ciclo de vida ayuda a detectar esos desplazamientos porque incorpora etapas anteriores y posteriores a la granja. No resuelve todas las incertidumbres —sus resultados dependen de límites, unidad funcional y supuestos—, pero impide considerar automáticamente como “baja en carbono” una intervención que solo desplaza emisiones fuera del lugar de medición.

La permanencia del efecto es otro punto subestimado. Una reducción observada durante algunas semanas no demuestra que la comunidad ruminal responda del mismo modo durante toda una lactancia o varios ciclos productivos.

Precisamente por ello Martins et al. (2024) incluyeron la duración de la suplementación entre las variables capaces de explicar diferencias en la eficacia de algunas estrategias. La evidencia de corto plazo sigue siendo valiosa, pero debe llamarse evidencia de corto plazo.

La productividad tampoco puede tratarse como una variable secundaria. Si un aditivo disminuyera fuertemente las emisiones por animal a costa de una caída aún mayor en leche o ganancia de peso, la intensidad por unidad comercializable podría empeorar y el productor asumiría además una pérdida económica. El objetivo operativo consiste en disminuir emisiones manteniendo salud, consumo y desempeño dentro de rangos aceptables.

El costo termina filtrando qué resultados sobreviven fuera de una estación experimental. Pupo et al. (2025) estimaron las consecuencias económicas de suministrar 3-NOP en vacas lecheras de Estados Unidos. Con una reducción media de metano del 27,9 % para la dosis promedio considerada, su análisis estimó una disminución media del ingreso sobre costo de alimentación de aproximadamente USD 0,35 por vaca y día para el escenario de referencia, de modo que alguna combinación de menor precio del aditivo, incentivo, pago por reducción o valor añadido tendría que cerrar la brecha. La intervención funciona biológicamente; eso no implica que se pague por sí sola.

La aceptación del productor y del mercado añade otra dimensión. Un compuesto que exige modificar almacenamiento de alimento, instalar un dosificador o registrar datos diariamente puede encontrar resistencia, aunque el costo directo parezca pequeño. De manera semejante, la confianza del consumidor depende de demostrar inocuidad y de explicar qué hace el aditivo, no simplemente de etiquetarlo como una tecnología climática.

Mitigar sin trasladar el problema exige, en definitiva, trabajar al menos con cuatro cuentas simultáneas: emisiones absolutas, emisiones por unidad de producto, balance económico y consecuencias sobre animal y ambiente. Cuando una de ellas desaparece del análisis, aumenta la probabilidad de optimizar una cifra a expensas del sistema.

2.3. Animales adaptados a sistemas que también están cambiando

2.3.1. Diversidad genética y valor de las razas adaptadas localmente

La selección ganadera del último siglo permitió incrementos extraordinarios de productividad, pero buena parte de ese progreso ocurrió bajo ambientes donde alimentación, sanidad y clima podían controlarse razonablemente. La expansión de esos genotipos hacia regiones tropicales, áridas o de alta variabilidad obliga a reconsiderar qué significa “mejor” animal.

Brito et al. (2021) revisaron la selección de bovinos lecheros de alto rendimiento y advierten que décadas de énfasis intenso en producción generaron respuestas desfavorables en algunos caracteres funcionales, lo que contribuyó a incorporar fertilidad, salud, longevidad, eficiencia y resiliencia a los objetivos modernos de mejoramiento. El cambio es relevante: la productividad deja de ser el único resultado y pasa a formar parte de un conjunto de atributos que determinan cuántos recursos necesita el animal para producir y durante cuánto tiempo puede hacerlo.

Las razas adaptadas localmente reúnen variación genética moldeada por ambientes concretos. Esa adaptación puede expresarse en tolerancia al calor, capacidad para mantener funciones reproductivas durante periodos de escasez, resistencia o tolerancia frente a determinadas enfermedades y parásitos, comportamiento de pastoreo o utilización de recursos fibrosos. Habimana et al. (2023) señalan la importancia de razas y cruzamientos adaptados al calor en sistemas lecheros tropicales, mientras que estudios genómicos siguen identificando señales de selección asociadas con la adaptación a ambientes extremos.

Conservar diversidad genética no significa congelar poblaciones en el tiempo ni rechazar el mejoramiento. Significa evitar que la búsqueda de unas pocas características productivas elimine variantes que podrían resultar valiosas ante temperaturas más elevadas, nuevos patrones de enfermedad o modificaciones

en la disponibilidad de alimento. Un recurso zoogenético difícil de recuperar puede desaparecer mucho antes de que se reconozca qué rasgos portaba.

2.3.2. Selección por eficiencia, rusticidad, salud y longevidad

La mejora genética orientada a sostenibilidad trabaja con objetivos más complejos porque varios caracteres importantes son difíciles de medir. Producción de leche o peso se registran de manera rutinaria; resiliencia frente a perturbaciones, consumo individual, susceptibilidad a enfermedad o emisión de metano requieren datos más costosos.

La eficiencia alimentaria ofrece un ejemplo. Manzanilla et al. (2022) analizaron la relación entre selección por eficiencia de alimentación y emisiones de metano en vacas lecheras y mostraron que ambos objetivos pueden integrarse, aunque las correlaciones genéticas y la definición del carácter elegido resultan decisivas. Seleccionar simplemente animales que comen menos sería una interpretación pobre; interesa identificar aquellos que utilizan recursos con mayor eficiencia sin comprometer producción, reservas corporales o capacidad de enfrentar desafíos.

La longevidad productiva modifica también la eficiencia a escala de rebaño. Cada hembra de reemplazo consume alimento y genera emisiones durante su crecimiento antes de producir leche o descendencia; si las vacas abandonan tempranamente el rebaño por infertilidad, cojeras, mastitis u otros problemas, aumenta la proporción de recursos destinada a reemplazos. Seleccionar por salud y supervivencia funcional puede parecer menos espectacular que elevar el pico de producción, pero cambia la estructura completa del sistema.

La tolerancia térmica adquiere mayor importancia a medida que los episodios de calor se vuelven más frecuentes. Cheruiyot et al. (2022) describen oportunidades de la selección genómica para mejorar tolerancia al calor en bovinos lecheros, aunque señalan dificultades relacionadas con fenotipado, disponibilidad de datos y posibles antagonismos con producción. Una respuesta genética lenta pero acumulativa puede complementar sombra, ventilación, agua y nutrición; no los reemplaza.

2.3.3. Genética y ambiente: por qué no existe un animal ideal para todos los sistemas

Un genotipo no expresa su potencial en el vacío. Temperatura, humedad, dieta, enfermedades, manejo, topografía y nivel de inversión modifican la forma en que aparecen sus características. Esta interacción genotipo-ambiente explica por qué la clasificación de animales o líneas genéticas puede cambiar entre sistemas.

Fodor et al. (2023) revisaron estudios sobre interacción genotipo-clima en bovinos, porcinos y pollos y confirmaron que el ambiente climático puede modificar la expresión genética de caracteres productivos y funcionales. La consecuencia práctica es importante para los programas de selección: importar material genético evaluado en un ambiente templado, con alimentación de alta calidad y bajo desafío sanitario no garantiza la misma ventaja cuando los descendientes se crían bajo calor, pastoreo estacional o restricciones de insumos.

Los sistemas tropicales ofrecen un ejemplo evidente. Animales altamente especializados pueden alcanzar producciones extraordinarias si disponen de dietas densas, instalaciones y refrigeración, pero esa misma fisiología genera mayores cargas metabólicas bajo calor. Una raza local con menor producción máxima puede conservar consumo, reproducción o supervivencia con menos infraestructura. La comparación económicamente relevante no es pico de producción frente a pico de producción, sino producción obtenida bajo los recursos y riesgos que realmente enfrenta cada explotación.

Los cruzamientos pueden combinar parte del potencial productivo de razas especializadas con caracteres de adaptación, aunque tampoco existe una proporción genética universalmente óptima. Dependerá de clima, mercado, oferta forrajera, sanidad y capacidad de manejo. El animal apropiado se define dentro del sistema que deberá sostenerlo.

2.4. Pasturas, árboles y territorio

2.4.1. Manejo del pastoreo y recuperación de suelos

El manejo de un potrero empieza por una relación básica: cuántos animales consumen una biomasa determinada y cuánto tiempo necesita la planta para recuperar superficie foliar y reservas. Cuando la carga supera de forma persistente la capacidad del terreno, la selección repetida de los rebrotes reduce cobertura, deja suelo expuesto y puede favorecer erosión o pérdida de especies deseables. Una carga demasiado baja tampoco garantiza buen manejo si el pasto envejece, pierde calidad y acumula material poco aprovechable.

Los tiempos de ocupación y descanso no deberían fijarse exclusivamente por calendario. Velocidad de crecimiento, precipitación, temperatura, fertilidad, especie forrajera y remanente posterior al pastoreo modifican el periodo necesario para volver a utilizar un potrero. La adaptación del manejo a esas señales biológicas resulta más defensible que aplicar un número idéntico de días durante estaciones contrastantes.

Los sistemas de pastoreo adaptativo multipotrero han generado especial interés por posibles efectos sobre productividad y carbono del suelo. Mehre et al. (2024) encontraron mayores existencias de carbono del suelo y una menor huella de carbono modelada en explotaciones de carne estudiadas en Ontario bajo manejo adaptativo multipotrero. Otros trabajos recientes han encontrado aumentos de carbono asociado a fracciones minerales, aunque con respuestas relacionadas con aridez y características del sitio.

Esos resultados no convierten el método en ley ecológica. Los diseños disponibles comparan ambientes específicos, algunos mediante pares de explotaciones y no mediante experimentos aleatorizados de largo plazo; precipitación, historia de uso, textura del suelo, carga y productividad inicial pueden modificar la respuesta. El aporte científico de estos estudios consiste en mostrar mecanismos y posibilidades que merecen probarse en más contextos, no en demostrar que cualquier incremento en densidad instantánea de animales secuestrará carbono.

Para el productor, el indicador inmediato sigue siendo el estado del potrero. Cobertura, altura o masa de forraje, composición botánica, presencia de suelo desnudo y respuesta de las plantas después del pastoreo ofrecen información para ajustar carga y descanso. El manejo adaptativo empieza con esa observación, no con el nombre del sistema.

2.4.2. Sistemas silvopastoriles e integración de componentes productivos

Un sistema silvopastoril combina deliberadamente árboles o arbustos con pasturas y animales. Esa definición aparentemente sencilla abarca diseños muy distintos: árboles dispersos, franjas, cercas vivas, bancos forrajeros, arreglos multiestrato o plantaciones maderables con pastoreo. Las respuestas productivas y ambientales cambian de manera considerable entre ellos.

Carvalho et al. (2024) revisaron los servicios ecosistémicos asociados con sistemas silvopastoriles y encontraron contribuciones potenciales relacionadas con regulación microclimática, ciclo de nutrientes, carbono, biodiversidad y producción. La palabra clave es potencial: cada servicio depende de la especie leñosa, densidad, arquitectura del dosel, clima, suelo y manejo animal.

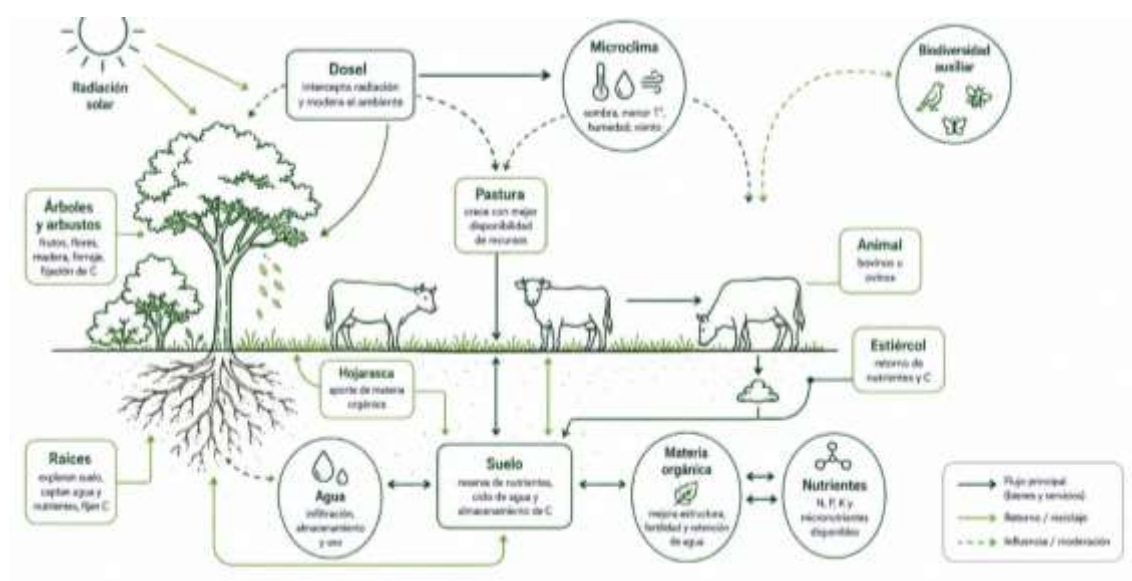
La sombra ilustra el equilibrio. Puede reducir la carga térmica sobre los animales y conservar determinadas condiciones de humedad, pero un dosel excesivamente cerrado disminuye radiación disponible para el estrato herbáceo y puede reducir producción del pasto. El diseño debe procurar suficiente cobertura arbórea para generar servicios sin convertir la competencia por luz, agua o nutrientes en una restricción mayor que el beneficio obtenido.

En América Latina existe una trayectoria importante de sistemas silvopastoriles, aunque su expansión ha sido desigual. Picasso y Pizarro (2024) describen la transición hacia sistemas perennes y diversos como una oportunidad para integrar producción, resiliencia y servicios ecosistémicos, pero la transformación exige más que demostrar ventajas biofísicas. La implantación de árboles requiere capital y paciencia, modifica el manejo del predio y compromete decisiones durante varios años.

El problema de adopción se observa con claridad en la Amazonía colombiana. Alvarado Sandino et al. (2023) analizaron 172 explotaciones en Caquetá y encontraron que los factores relacionados con adopción son específicos del contexto; acceso a mercados, percepciones, características socioeconómicas y diseño de políticas condicionan la decisión. La existencia de árboles beneficiosos en un ensayo no paga por sí sola cercas, plántulas, mano de obra ni años de establecimiento.

Figura 6.

Arquitectura funcional de un sistema silvopastoril



2.4.3. Agua, sombra y microclimas como recursos productivos

El agua y la sombra suelen aparecer en los presupuestos como infraestructura, pero biológicamente son insumos productivos. Un animal sometido a carga térmica modifica respiración, comportamiento, consumo, utilización de energía y horarios de alimentación; las pérdidas dejan de ser exclusivamente una cuestión de bienestar cuando disminuyen producción o eficiencia.

La síntesis realizada por Chen et al. (2024) confirma que el estrés térmico reduce consumo de materia seca y producción de leche en vacas y puede alterar composición y eficiencia alimentaria. La respuesta no surge únicamente durante temperaturas extremas: humedad, radiación, movimiento del aire, producción

metabólica de calor y posibilidad de disiparlo determinan la carga final sobre el animal.

La sombra natural o artificial puede disminuir radiación directa, pero su beneficio productivo depende de superficie disponible, orientación, ventilación y concentración de animales. Una pequeña área sombreada para un grupo grande genera competencia y acumulación de estiércol; un sistema arbóreo muy denso puede mejorar confort mientras reduce forraje. El diseño debe observar simultáneamente al animal y al potrero.

El acceso al agua merece el mismo análisis. Distancias excesivas entre puntos de bebida y zonas de pastoreo modifican desplazamiento, uso espacial de las parcelas y concentración de nutrientes. Caudal insuficiente puede convertirse en limitante precisamente durante las horas de mayor demanda. En sistemas extensivos, distribuir estratégicamente bebederos no solo garantiza consumo, también puede ayudar a modificar patrones de ocupación del terreno.

2.5. Cuando los residuos dejan de ser residuos

2.5.1. Estiércol, nutrientes y fertilidad del suelo

El estiércol contiene nitrógeno, fósforo, potasio, carbono y micronutrientes que ingresaron originalmente mediante el alimento. Considerarlo únicamente un desecho rompe el ciclo económico de esos nutrientes: la explotación paga por introducirlos y luego vuelve a pagar fertilizantes mientras enfrenta costos para disponer del residuo.

El valor agronómico no elimina el riesgo. Hollas et al. (2022) muestran que las rutas de manejo del estiércol ocupan una posición central dentro de la economía circular pecuaria, pero un manejo incorrecto puede contribuir a eutrofización, sobrecarga de nutrientes y dispersión de contaminantes. La diferencia entre recurso y problema depende de almacenamiento, tratamiento, dosis y momento de aplicación.

Los sistemas líquidos favorecen determinados procesos anaerobios; los materiales sólidos siguen rutas distintas y pueden compostarse. El compostaje reduce volumen, transforma materia orgánica y genera un material más estable, aunque un proceso mal aireado o con relaciones inadecuadas entre humedad y

sustrato puede mantener pérdidas importantes de nitrógeno. Cubrir almacenamientos, separar fracciones, ajustar tiempo de permanencia o tratar el material son opciones útiles únicamente cuando responden al tipo de estiércol disponible.

Yan et al. (2024) advierten sobre las compensaciones entre CH_4 , N_2O y NH_3 en la cadena de manejo. Esto obliga a evitar recomendaciones aisladas: conservar nitrógeno durante almacenamiento tiene poco sentido si después se aplica sobre un suelo saturado o antes de lluvias intensas. La fertilización orgánica debe utilizar análisis del material, necesidades del cultivo, historial del lote y condiciones meteorológicas con una lógica comparable a la empleada para fertilizantes minerales.

Tabla 6.

Opciones de manejo del estiércol y principales compensaciones

Manejo	Función buscada	Ventajas potenciales	Riesgos o condiciones
Almacenamiento con medidas de control	Conservar material hasta su utilización	Facilita sincronizar aplicación con necesidad agronómica	Emisiones durante almacenamiento, capacidad insuficiente, fugas o reboses. Yan et al. (2024)
Compostaje	Estabilizar fracción sólida y facilitar manejo	Menor volumen y producto más manejable	Pérdidas de N y emisiones si aireación, humedad o proceso son deficientes. Hollas et al. (2022)
Digestión anaerobia	Capturar biogás y estabilizar parte de la materia orgánica	Recuperación energética y control de CH_4 que de otro modo podría liberarse	Capital, operación, disponibilidad continua de sustrato y manejo posterior del digestato. Greene et al. (2024)
Aplicación agronómica	Devolver nutrientes a suelo y cultivos	Sustitución parcial de fertilizante mineral	Sobredosificación, NH_3 , N_2O , lixiviación y escorrentía cuando aplicación y demanda no coinciden. Yan et al. (2024)

2.5.2. Biogás y recuperación de energía

La digestión anaerobia utiliza microorganismos para degradar materia orgánica sin oxígeno y producir un biogás rico en metano que puede quemarse para generar calor, electricidad o, después de un acondicionamiento adecuado,

utilizarse en otras aplicaciones energéticas. Su atractivo en ganadería deriva de capturar metano procedente de residuos que, bajo otros sistemas de almacenamiento anaerobio, podría escapar directamente a la atmósfera.

La tecnología funciona especialmente bien cuando existe un flujo suficientemente grande y regular de sustrato, infraestructura para recolectarlo, capacidad para operar el digestor y un uso económico del gas. Greene et al. (2024) modelaron diferentes configuraciones de grandes explotaciones lecheras estadounidenses y encontraron un potencial significativo de reducción de gases de efecto invernadero mediante digestión anaerobia, aunque sus resultados dependen del manejo de referencia, clima, tecnología, almacenamiento y destino del material. El propio diseño del estudio deja claro por qué una estimación obtenida para grandes lecherías no puede trasladarse directamente a una pequeña finca.

Un biodigestor pequeño puede ser útil donde el gas sustituye realmente leña, GLP o electricidad y la familia dispone de mano de obra y sustrato estable; también puede convertirse en infraestructura abandonada si se dimensiona para una carga que la explotación no produce, requiere mantenimiento que nadie puede ofrecer o genera más gas del que existe capacidad de aprovechar. En explotaciones grandes aparecen otras economías de escala, pero también mayores inversiones, sistemas de seguridad, mantenimiento especializado y necesidades de conexión energética.

El digestato tampoco desaparece. Conserva una proporción importante de los nutrientes y requiere almacenamiento y aplicación agronómica. Presentar el biodigestor como una máquina que “elimina residuos” es conceptualmente incorrecto: transforma materia orgánica, captura energía y modifica características del material, pero el balance de nutrientes continúa abierto.

2.5.3. La granja dentro de una economía circular

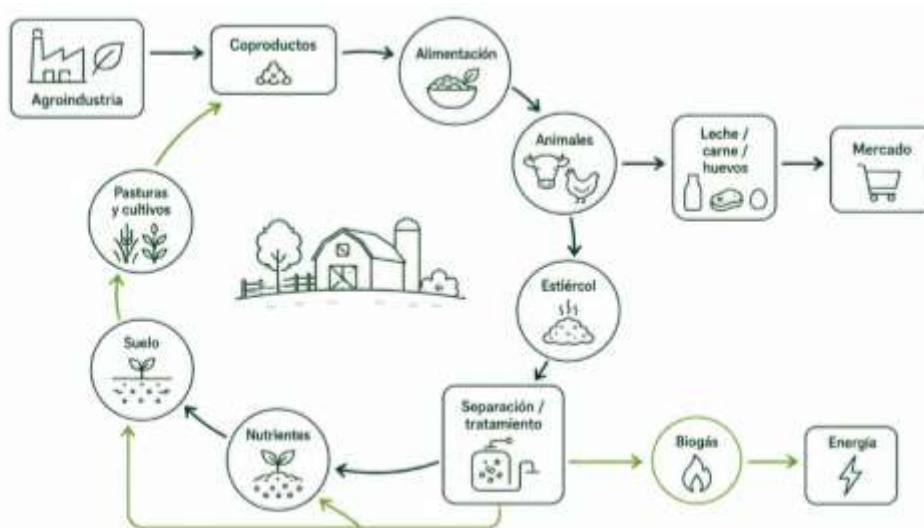
Una economía pecuaria circular no comienza en la planta de tratamiento, sino en la formulación. Cuanto más precisamente se ajusta la dieta, menor es el excedente de nutrientes que posteriormente deberá gestionarse. Los nutrientes inevitables del estiércol pueden retornar a pasturas y cultivos; esos cultivos

producen alimento; los animales transforman parte de ese alimento en productos y devuelven otra fracción al ciclo.

Las agroindustrias amplían el circuito. Salvados, tortas, pulpas y otros coproductos pueden ingresar a la granja como alimento, mientras que nutrientes orgánicos pueden regresar a superficies productivas. Govoni et al. (2023) muestran el potencial de reemplazar parte de los cultivos específicamente destinados a alimentación animal con subproductos existentes; Hollas et al. (2022) sitúan el manejo del estiércol dentro de esa misma lógica de recuperación de recursos. Circularidad, en este caso, significa disminuir entradas y salidas desperdiciadas, no forzar que todos los flujos permanezcan físicamente dentro de una sola finca.

Figura 7.

Circuito de economía circular dentro y alrededor de la explotación pecuaria



2.6. La sostenibilidad también tiene que ser viable

2.6.1. Costos, retornos y decisiones del productor

Las decisiones de una explotación ocurren bajo restricciones de caja, deuda, mano de obra, tierra, información y riesgo. Una tecnología puede ser rentable durante diez años y seguir siendo inaccesible para un productor que debe pagar la inversión inicial durante el primero; también puede presentar una tasa de

retorno atractiva en promedio y ser rechazada porque el ingreso futuro depende de un precio o incentivo demasiado incierto.

La evaluación económica debería separar inversión inicial de costos variables. Cercas y establecimiento de árboles en un sistema silvopastoril implican desembolsos que se recuperan durante varios años; un aditivo alimentario genera un gasto recurrente mientras se suministra; la mejora del manejo de pasturas puede requerir infraestructura relativamente sencilla, pero demanda mayor observación y toma de decisiones. Dos intervenciones con beneficios ambientales semejantes pueden tener perfiles financieros completamente diferentes.

El 3-NOP permite observar esa diferencia entre eficacia biológica y rentabilidad privada. Como se señaló anteriormente, Pupo et al. (2025) calcularon un menor ingreso sobre costo de alimentación en su escenario estadounidense de referencia pese a la reducción de metano. El resultado no invalida la tecnología; indica que el beneficio climático no necesariamente aparece como ingreso en la cuenta del ganadero. Un mecanismo que remunere emisiones evitadas podría modificar la decisión, pero el valor de ese incentivo tendría que ser suficientemente estable para justificar el compromiso.

Las prácticas con co-beneficios productivos tienen otra lógica. Una mejora en calidad de forraje que reduce pérdidas, aumenta ganancia de peso y disminuye intensidad de metano puede generar retorno sin depender exclusivamente de pagos ambientales. Una sombra bien diseñada puede sostener consumo durante periodos cálidos y, simultáneamente, mejorar las condiciones de los animales. Ese tipo de intervención tiende a ser más robusto porque su viabilidad no descansa en una sola fuente de valor.

No todas las explotaciones responden igual al riesgo. Una empresa grande puede financiar sensores, instalaciones de alimentación de precisión o digestores y distribuir su costo entre miles de animales; una unidad familiar suele depender de soluciones modulares y de retornos más rápidos. Comparar tecnologías solo por eficiencia técnica favorece sistemáticamente a quienes ya cuentan con capital e infraestructura.

2.6.2. De las experiencias exitosas a soluciones que puedan escalarse

Un ensayo experimental demuestra, en el mejor de los casos, que una intervención puede producir determinado efecto bajo condiciones controladas. Una experiencia piloto pregunta si ese efecto puede mantenerse en una explotación real. Una innovación comercial añade fabricación, distribución, calidad, regulación, asistencia y un precio. La adopción extendida exige todavía algo más: que numerosos productores encuentren razones económicas y operativas para mantenerla durante varios ciclos.

Confundir esas etapas genera expectativas poco realistas. *Asparagopsis* ha demostrado una capacidad experimental extraordinaria para disminuir metano, pero la magnitud obtenida por Roque et al. (2021) no convierte automáticamente al alga en una solución disponible y económicamente equivalente para millones de bovinos en pastoreo. El 3-NOP dispone de una base meta-analítica más amplia y una ruta de administración especialmente compatible con raciones controladas, aunque el trabajo de Pupo et al. (2025) recuerda que incluso una intervención técnicamente madura necesita resolver el retorno económico.

El problema de escala se encuentra con frecuencia en inversión, conocimiento, tenencia, mercados y tiempo de establecimiento. El estudio de Alvarado Sandino et al. (2023) resulta especialmente ilustrativo porque muestra que los factores de adopción observados en la Amazonía colombiana no pueden separarse de las características socioeconómicas y territoriales de los productores.

Los biodigestores recorren un camino semejante. La digestión anaerobia es una tecnología consolidada, pero su viabilidad cambia con escala, concentración de animales, sistema de recolección del estiércol, precio de la energía y posibilidades de utilizar el biogás. El hecho de que Greene et al. (2024) documenten un importante potencial en grandes explotaciones lecheras no demuestra que el mismo diseño pueda instalarse rentablemente en unidades pequeñas. Escalar no significa copiar una instalación; significa adaptar su principio a una nueva estructura de costos y recursos.

Para pequeños y medianos productores suelen ser especialmente importantes el modularidad, la posibilidad de probar primero en una parte de la finca, el acceso a asistencia técnica y la existencia de beneficios perceptibles durante periodos relativamente cortos. Una innovación que exige fuertes desembolsos antes de demostrar resultados coloca gran parte del riesgo sobre quien tiene menor capacidad para absorber un fracaso. Crédito adecuado, asociatividad, servicios compartidos, mercados para coproductos e incentivos ambientales pueden modificar esa ecuación, pero únicamente si los costos administrativos de acceder a ellos no consumen el beneficio esperado.

El criterio de escalabilidad debe incorporar además una pregunta incómoda: ¿qué ocurre con el animal cuando se intenta llevar la eficiencia al límite? Reducir consumo residual, aumentar producción por plaza, concentrar energía en la dieta o elevar carga animal pueden mejorar determinados indicadores y, aun así, generar costos biológicos si desaparecen los márgenes para enfrentar calor, enfermedad, competencia o variaciones del alimento. La literatura genética reciente ya se ha desplazado hacia salud, longevidad, resiliencia y tolerancia térmica precisamente porque la producción máxima no captura por sí sola la funcionalidad del animal. Brito et al. (2021) sitúan ese cambio dentro de los nuevos objetivos de selección, mientras que Chen et al. (2024) muestran cómo una condición ambiental aparentemente externa, el estrés por calor, reduce simultáneamente consumo y producción.

La consecuencia productiva aparece sin necesidad de convertirla en una declaración moral. Un animal que enferma con frecuencia, pierde fertilidad, disminuye consumo bajo calor, se lesiona o abandona prematuramente el rebaño obliga a utilizar alimento, reemplazos, medicamentos, mano de obra y capital adicionales. Salud y condiciones de vida dejan entonces de ser variables paralelas a la eficiencia y pasan a formar parte de ella. Una producción realmente capaz de aprovechar mejor sus recursos necesita animales que puedan sostenerla, lo que desplaza la discusión hacia la relación entre rendimiento, bienestar, prevención y salud dentro de sistemas pecuarios cada vez más exigentes.

**Capítulo III. El animal en el centro: bienestar, salud y
responsabilidad compartida**

El animal en el centro: bienestar, salud y responsabilidad compartida

La sostenibilidad de un sistema pecuario suele examinarse a partir de su capacidad para producir alimentos, utilizar eficientemente los recursos, mantener la rentabilidad y reducir impactos ambientales. Sin embargo, existe otra escala de análisis que no puede quedar absorbida por los indicadores del establecimiento: la experiencia del animal que vive dentro de ese sistema. Un alojamiento técnicamente eficiente, una dieta correctamente formulada o una elevada productividad no describen por sí solos cómo se encuentra un bovino, un cerdo, un ave o un pequeño rumiante. El bienestar surge precisamente de esa diferencia entre observar el funcionamiento de la unidad productiva y observar al individuo que responde, fisiológica y conductualmente, a las condiciones que le han sido proporcionadas.

Esta distinción ha modificado profundamente la ciencia del bienestar animal. La Organización Mundial de Sanidad Animal define actualmente el bienestar como el estado físico y mental de un animal en relación con las condiciones en las que vive y muere, una formulación que desplaza la discusión desde la simple disponibilidad de recursos hacia las consecuencias que dichos recursos, el manejo y el ambiente generan sobre el propio animal (OMSA, 2025). El interés científico deja entonces de estar centrado únicamente en evitar enfermedad, hambre o lesiones y comienza a preguntarse también por la posibilidad de descansar, explorar, interactuar, ejercer cierto control sobre el ambiente y experimentar estados afectivos favorables.

3.1. Qué significa realmente que un animal esté bien

3.1.1. Del concepto tradicional de bienestar a los enfoques actuales

Una parte importante de la construcción contemporánea del bienestar animal procede de las Cinco Libertades, marco que organizó durante décadas necesidades esenciales relacionadas con alimentación, alojamiento, salud, comportamiento y ausencia de miedo o angustia. Su influencia fue considerable porque permitió traducir preocupaciones generales en ámbitos concretos de

manejo. No obstante, interpretar las Cinco Libertades como una descripción completa del bienestar resulta hoy insuficiente; su formulación está orientada principalmente a identificar condiciones negativas que deberían prevenirse o aliviarse, mientras que la ciencia actual reconoce que una vida aceptable no depende exclusivamente de reducir experiencias adversas.

Los Cinco Dominios representan una evolución conceptual diferente. Mellor et al. (2020) organizan la evaluación alrededor de nutrición, ambiente físico, salud e interacciones conductuales, cuyos efectos convergen en un quinto dominio referido al estado mental. El cambio es importante porque el modelo no pregunta solamente si existe hambre, dolor, enfermedad o temor; también permite valorar oportunidades que pueden favorecer saciedad, comodidad, exploración, interacción social, seguridad, interés o placer. Las experiencias negativas continúan siendo fundamentales, aunque dejan de constituir el único referente.

Los dos modelos, por tanto, no deberían utilizarse como expresiones intercambiables de una misma idea. Las Cinco Libertades desempeñaron una función histórica decisiva al establecer condiciones mínimas y orientar normas de protección; los Cinco Dominios ofrecen una arquitectura más adecuada para interpretar científicamente cómo esas condiciones repercuten en la experiencia del animal. Esta ampliación ha favorecido el desarrollo del concepto de bienestar positivo, entendido no como una declaración de que el animal se encuentra permanentemente en un estado agradable, sino como la existencia de oportunidades suficientemente relevantes para que pueda desarrollar comportamientos motivados y experimentar estados positivos. Rowe y Mullan (2022) advierten que los sistemas de evaluación comienzan justamente a incorporar esta dimensión, aunque medirla en granja todavía resulta más complejo que registrar lesiones, mortalidad o enfermedad.

Las necesidades conductuales adquieren particular importancia dentro de esta interpretación. Un cerdo puede recibir una dieta nutricionalmente adecuada y seguir mostrando una fuerte motivación por explorar o manipular materiales; una gallina puede encontrarse clínicamente sana y, sin embargo, carecer de oportunidades para realizar conductas altamente motivadas; una vaca puede mantener producción de leche aun cuando el tiempo disponible para descanso

sea insuficiente. Lo relevante no es imponer una lista universal de comportamientos deseables, sino reconocer que cada especie posee repertorios y prioridades diferentes y que la imposibilidad persistente de expresar determinados comportamientos puede convertirse en información sobre su estado de bienestar.

3.1.2. Salud, comportamiento y estado emocional

Salud y bienestar mantienen una relación estrecha, pero no son conceptos equivalentes. Enfermedades dolorosas, lesiones, parasitosis, trastornos respiratorios, mastitis o cojeras deterioran directamente el bienestar, mientras que un ambiente deficiente puede incrementar susceptibilidad a determinadas enfermedades. Aun así, la ausencia de diagnóstico clínico no demuestra automáticamente que el animal se encuentre bien; puede estar sano desde el punto de vista estrictamente biomédico y enfrentar competencia excesiva, miedo a los operarios, limitaciones de movimiento, incomodidad térmica o escasas oportunidades de realizar comportamientos motivados.

Tampoco la productividad constituye un sustituto fiable. Durante una parte del ciclo productivo, determinados animales pueden mantener un rendimiento elevado mientras desarrollan problemas locomotores, metabólicos o conductuales. En vacas lecheras, por ejemplo, la información registrada rutinariamente en las explotaciones puede aportar señales valiosas sobre salud y bienestar, aunque Lutz et al. (2021) muestran que ninguna variable aislada representa adecuadamente el estado global del animal. Producción, condición corporal, fertilidad, recuentos relacionados con salud mamaria, longevidad y registros sanitarios adquieren mayor significado cuando se interpretan conjuntamente con observaciones directas.

El comportamiento ofrece otra ventana de observación. Cambios en el tiempo de descanso, locomoción, alimentación, consumo de agua, interacción social, exploración o respuesta ante personas pueden indicar que algo está modificando la experiencia del animal; aun así, tampoco conviene atribuir automáticamente a una conducta una emoción específica. Un aumento de actividad puede relacionarse con excitación, búsqueda de recursos, estrés térmico o alteraciones

sociales, mientras que una disminución puede obedecer a enfermedad, dolor, fatiga o características propias del momento productivo.

Los estados emocionales no pueden preguntarse directamente al animal, de modo que se infieren mediante combinaciones de conducta, fisiología, contexto y respuestas ante estímulos. Esa inferencia debe conservar prudencia científica: miedo, dolor, frustración o placer son experiencias plausibles y estudiables, pero necesitan indicadores suficientemente validados. Los Cinco Dominios resultan útiles precisamente porque evitan reducir el estado mental a una observación aislada; cada inferencia se construye a partir de consecuencias funcionales observadas en los dominios físicos y conductuales.

3.1.3. Indicadores para evaluar el bienestar en condiciones reales de producción

Evaluar bienestar en una explotación exige pasar de principios generales a medidas observables. Los indicadores basados en el animal ocupan una posición central porque muestran el resultado de la interacción entre genética, alimentación, instalaciones, clima, manejo, salud y experiencia previa. Brscic et al. (2021) destacan la expansión de estas medidas dentro de los protocolos científicos: condición corporal, alteraciones locomotoras, heridas, lesiones cutáneas, limpieza, signos respiratorios, mortalidad, conducta social o respuestas frente al ser humano son ejemplos cuya pertinencia depende de la especie y del objetivo evaluado.

Los indicadores de recursos describen aquello que el sistema ofrece: superficie disponible, diseño de corrales, disponibilidad de sombra, calidad de cama, ventilación, número y acceso a bebederos, comederos, enriquecimiento ambiental o características del suelo. Son necesarios, aunque la existencia de un recurso no garantiza que pueda utilizarse adecuadamente; un bebedero puede estar presente y resultar insuficiente durante periodos de alta demanda, una zona de descanso puede existir pero permanecer húmeda o una instalación de sombra puede generar una competencia que excluya a animales subordinados.

Los indicadores de manejo se concentran en procedimientos y decisiones: frecuencia de inspección, protocolos sanitarios, entrenamiento del personal, forma de mover los animales, estrategias frente a enfermedades, utilización de analgesia, criterios de descarte, registros de mortalidad o respuesta ante eventos climáticos. La OMSA recomienda priorizar las medidas basadas en el animal siempre que sean factibles, complementándolas con recursos y manejo para interpretar causas y establecer medidas correctivas. Este principio aparece incluso en sus recomendaciones actuales para el sacrificio, donde los resultados observados directamente en los animales deben ocupar una posición preferente (OMSA, 2025).

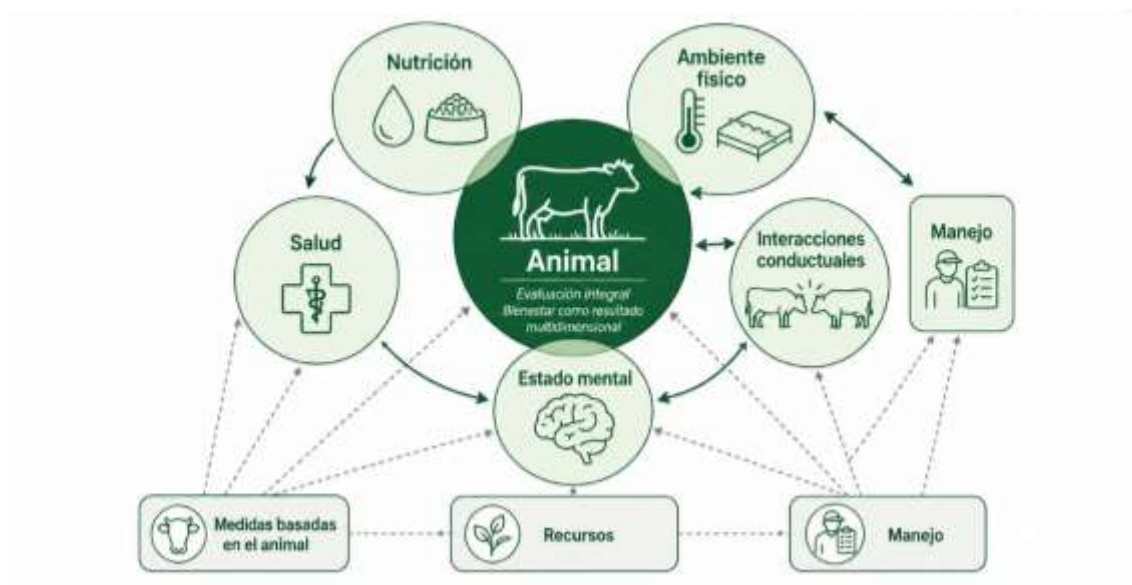
Tabla 7.

Ejemplos de indicadores de bienestar aplicables en condiciones productivas

Especie o grupo	Indicadores basados en el animal	Recursos relevantes	Aspectos de manejo
Bovinos de leche	Cojera, condición corporal, lesiones, limpieza, mastitis, tiempo de descanso, respuesta al humano	Superficie de descanso, cama, sombra, agua, comedero, ventilación	Ordeño, detección de enfermedad, manejo podal, desplazamiento y agrupamiento
Bovinos de carne	Condición corporal, lesiones, cojera, signos respiratorios, conducta social, respuesta de fuga	Agua, sombra, superficie, densidad, protección climática	Arreo, vacunación, mezcla de grupos, procedimientos sanitarios
Cerdos	Lesiones corporales y de cola, cojera, condición corporal, tos, conducta exploratoria, miedo	Densidad, calidad del piso, material manipulable, agua, temperatura	Mezcla, alimentación, procedimientos rutinarios, manejo de enfermos
Pollos de engorde	Marcha, dermatitis plantar, lesiones de corvejón, limpieza del plumaje, jadeo, mortalidad	Cama, densidad, ventilación, temperatura, iluminación, agua	Inspección, captura, manejo de cama, respuesta al estrés térmico
Ovinos y caprinos	Condición corporal, cojera, lesiones, estado del pelaje o vellón, signos parasitarios, comportamiento	Refugio, disponibilidad de forraje y agua, sombra, espacio	Manejo sanitario, esquila, agrupamiento, transporte

Figura 8.

Evaluación multidimensional del bienestar animal



3.2. Bienestar a lo largo de la vida productiva

3.2.1. Alimentación, alojamiento y confort

Un animal puede recibir una ración nutricionalmente equilibrada y, al mismo tiempo, experimentar restricciones para acceder a ella. Por eso la alimentación debe analizarse no solo a partir de composición y cantidad, sino también de distribución, competencia, frecuencia y facilidad de acceso. La ubicación de comederos y bebederos, su número, el caudal de agua y la composición de los grupos sociales pueden generar diferencias considerables entre individuos de una misma explotación.

Las necesidades cambian además entre especies. En bovinos, el descanso prolongado y la posibilidad de acostarse y levantarse sin interferencias constituyen componentes importantes del confort; superficies resbaladizas, camas húmedas o espacios mal dimensionados pueden modificar el comportamiento de reposo y favorecer lesiones. Los cerdos requieren posibilidades de descanso simultáneo, regulación térmica y exploración, mientras que los pollos de engorde responden con especial sensibilidad a la calidad de cama, ventilación, temperatura y densidad. Los pequeños rumiantes

manejados extensivamente enfrentan problemas distintos: disponibilidad espacial de agua y alimento, protección frente a eventos climáticos, desplazamientos prolongados o presión parasitaria.

El confort térmico merece atención creciente porque la temperatura ambiental interactúa con humedad, ventilación, radiación, densidad, peso corporal y nivel productivo. Goel (2021) describe en aves alteraciones de consumo, fisiología, inmunidad y desempeño asociadas con estrés térmico, mientras Liu et al. (2022) documentan en cerdos efectos que alcanzan reproducción y crecimiento. Una disminución productiva puede constituir una consecuencia visible, pero desde el bienestar interesa detectar el problema antes de que el rendimiento se deteriore de manera evidente, observando jadeo, cambios posturales, búsqueda de agua, reducción de actividad, cambios en descanso y competencia por zonas más frescas.

Alojamiento y confort tampoco deberían evaluarse mediante un modelo único de instalación. Un sistema abierto puede ofrecer mayores oportunidades conductuales y, simultáneamente, exponer a barro, parásitos, radiación o extremos térmicos; un alojamiento confinado puede facilitar control sanitario y climático, pero crear restricciones espaciales o conductuales si su diseño es deficiente. La pregunta científicamente útil no consiste en determinar qué etiqueta productiva es intrínsecamente superior, sino qué consecuencias observables produce cada combinación de ambiente, genética, clima y manejo sobre los animales.

3.2.2. Manejo, interacción humana y procedimientos rutinarios

La interacción con las personas forma parte del ambiente del animal. El operario que alimenta, vacuna, moviliza, ordeña, revisa o transporta no constituye un elemento externo al sistema de bienestar; su comportamiento puede generar previsibilidad y reducir miedo o, por el contrario, convertir procedimientos cotidianos en fuentes repetidas de estrés. Rault et al. (2020) muestran que una relación humano-animal positiva puede afectar la manera en que los animales responden a la proximidad y manipulación, mientras investigaciones en producción porcina han relacionado características de esta relación con prácticas de manejo, bienestar y productividad. Pol et al. (2021)

El manejo de bajo estrés se fundamenta precisamente en conocer la percepción y los patrones de movimiento de cada especie, utilizar posiciones corporales y velocidades adecuadas, reducir ruido, evitar presión innecesaria y permitir que los animales encuentren rutas de avance comprensibles. No significa que cualquier procedimiento pueda transformarse en una experiencia positiva; su objetivo es disminuir componentes evitables de miedo, excitación, golpes, resbalones o uso excesivo de instrumentos de conducción.

Los procedimientos potencialmente dolorosos requieren un análisis adicional. Castración, descorne, descole y otras intervenciones varían según especie, sistema y contexto regulatorio, pero la evidencia disponible confirma que el dolor no tratado produce cambios conductuales, autonómicos y neuroendocrinos. Steagall et al. (2021) subrayan la necesidad de integrar evaluación del dolor y estrategias de mitigación en bovinos, ovinos y cerdos; Adcock (2021) añade que algunos procedimientos realizados tempranamente pueden tener consecuencias que exceden el periodo inmediatamente posterior a la intervención.

La decisión técnica no debería limitarse a elegir entre realizar o prohibir una práctica. Antes corresponde preguntar si el procedimiento sigue siendo necesario, si existen alternativas viables, cuál es la edad más adecuada, qué método ocasiona menor daño, qué analgesia o anestesia está indicada y cómo se vigilará posteriormente al animal. La intervención veterinaria adquiere aquí una función preventiva, porque el bienestar no se mejora únicamente tratando complicaciones, sino revisando críticamente la forma en que se ejecutan procedimientos habituales.

3.2.3. Transporte y final de la vida productiva

El transporte reúne varios factores de riesgo en un periodo relativamente corto: separación del ambiente conocido, manipulación, carga, vibración, ruido, cambios térmicos, ayuno, restricción de movimiento y mezcla social. La intensidad de la respuesta no depende únicamente de la duración; influyen aptitud previa para viajar, especie, edad, experiencia, diseño del vehículo, densidad, ventilación, conducción, clima, disponibilidad de agua y calidad de las operaciones de carga y descarga.

Los estándares actuales de la OMSA establecen que el tiempo de viaje debe mantenerse tan corto como sea posible y distribuyen responsabilidades entre propietarios, transportistas, operarios, gestores de instalaciones y autoridades competentes (OMSA, 2025). La aptitud para el transporte constituye un punto crítico: animales incapaces de sostenerse, severamente lesionados, fatigados o cuya movilización aumente el sufrimiento no deberían incorporarse a un viaje ordinario. En enero de 2026, la propia OMSA volvió a enfatizar que el transporte requiere planificación del recorrido completo, infraestructura adecuada, competencias del personal y coordinación entre los actores involucrados (OMSA, 2026).

Los dictámenes científicos de EFSA muestran además que temperatura, espacio, duración y condiciones del viaje interactúan de manera distinta según la especie. Sus evaluaciones sobre bovinos y cerdos proporcionan evidencia detallada sobre consecuencias como estrés térmico, fatiga, sed, lesiones y dificultades para descansar, aunque los valores técnicos derivados de condiciones europeas no deberían trasladarse mecánicamente a todas las regiones productivas (EFSA Panel on Animal Health and Welfare, 2022a, 2022b). En América Latina, donde distancias, infraestructura vial, clima y estructura de las cadenas pueden variar considerablemente, el principio útil es evaluar el riesgo contextual y no copiar un único tiempo de viaje como si resumiera todos los factores de bienestar.

El final de la vida productiva tampoco comienza en el momento exacto del sacrificio. Descarga, espera, mezcla de grupos, acceso a agua, condiciones térmicas, conducción hacia el área de aturdimiento y capacidad del personal forman una secuencia en la que los efectos pueden acumularse. El capítulo vigente de la OMSA sobre bienestar durante el sacrificio reconoce como peligros la privación de alimento y agua, ambientes desconocidos, movimiento forzado, espacio limitado, condiciones meteorológicas adversas y fallas de aturdimiento o sangrado, al mismo tiempo que recomienda utilizar indicadores basados en el animal para verificar resultados (OMSA, 2025).

El cumplimiento real exige observar caídas, resbalones, vocalizaciones, lesiones, intentos de escape, recuperación de la conciencia o signos compatibles

con un aturdimiento ineficaz, y disponer de procedimientos correctivos inmediatos. Una instalación puede cumplir documentalmente con especificaciones de diseño y seguir generando resultados deficientes si el flujo de animales es excesivo, el mantenimiento falla o el personal no posee las competencias necesarias.

3.3. La salud del rebaño comienza antes de la enfermedad

3.3.1. Prevención, vigilancia y bioseguridad

Una explotación no se vuelve biosegura por colocar un arco de desinfección en su entrada. La bioseguridad funciona como un conjunto de barreras relacionadas y necesita responder a rutas específicas de introducción y circulación de agentes. Alarcón et al. (2021) diferencian con claridad la bioseguridad externa, orientada a reducir la entrada de patógenos, de la interna, destinada a limitar su propagación una vez presentes en el establecimiento.

La primera incluye criterios de ingreso de animales, cuarentena, procedencia, movimientos de personas y vehículos, alimento, agua, material biológico, fauna silvestre y control de visitantes. La segunda comprende separación de grupos, circulación del personal, limpieza, desinfección, manejo de enfermos, gestión de cadáveres, equipos, ropa y calzado específicos, así como organización de flujos entre zonas de diferente riesgo. Su eficacia depende de consistencia; una barrera técnicamente correcta pierde valor cuando se aplica solo durante periodos de alerta.

La vigilancia completa el sistema porque ninguna explotación puede asumir riesgo cero. Observaciones clínicas, registros de mortalidad, consumo, reproducción, laboratorio y comportamiento permiten identificar desviaciones antes de que un brote alcance gran magnitud. La revisión sistemática de Youssef et al. (2021) muestra que la evidencia sobre intervenciones concretas puede variar según patógeno y sistema, lo que obliga a evitar recetas universales y priorizar medidas cuyo mecanismo de reducción del riesgo resulte razonablemente establecido.

Prevención y respuesta ante brotes representan, por tanto, fases distintas. La prevención procura disminuir la probabilidad de introducción y transmisión;

cuando la enfermedad aparece, las prioridades cambian hacia detección, confirmación, aislamiento, trazabilidad, tratamiento cuando corresponda, notificación, restricciones de movimiento y otras medidas definidas por el agente y la autoridad sanitaria. Confundir ambas etapas conduce a planes que describen numerosas barreras, pero carecen de instrucciones claras para actuar cuando esas barreras fallan.

Tabla 8.

Diferencias funcionales entre bioseguridad externa e interna

Dimensión	Bioseguridad externa	Bioseguridad interna
Objetivo	Reducir la introducción de agentes	Reducir la transmisión dentro de la explotación
Animales	Origen, certificación, cuarentena, pruebas	Separación de enfermos, flujos y manejo por grupos
Personas	Control de ingreso, ropa y calzado	Secuencia de trabajo entre zonas y lotes
Vehículos/equipos	Limpieza y desinfección antes del ingreso	Evitar intercambio entre áreas sin saneamiento
Ambiente	Control de vectores, fauna y accesos	Limpieza, cama, residuos y cadáveres
Información	Historial sanitario y trazabilidad	Vigilancia, registros y detección de cambios

Figura 9.

Ruta preventiva de salud dentro de la explotación



3.3.2. Enfermedades emergentes y nuevos escenarios epidemiológicos

Los escenarios epidemiológicos pecuarios se modifican cuando cambian los contactos entre poblaciones. El movimiento de animales, personas, insumos y vehículos conecta establecimientos antes relativamente aislados, mientras el comercio puede ampliar las distancias recorridas por agentes infecciosos. La expansión de algunas enfermedades no responde, sin embargo, a una sola causa; densidad animal, inmunidad, bioseguridad, fauna silvestre, características del patógeno y estructura de las redes de movimiento interactúan de formas diferentes.

El clima añade otra capa de complejidad. Temperatura y precipitación condicionan supervivencia y distribución de determinados vectores, modifican patrones de contacto y pueden afectar directamente la capacidad de los animales para afrontar desafíos sanitarios. Chala y Hamde (2021) muestran que las enfermedades transmitidas por vectores requieren considerar conjuntamente factores biológicos, ambientales y de control. Esto no permite predecir qué enfermedad producirá una futura crisis ni cuándo ocurrirá; sí justifica incorporar información climática y ecológica dentro de la vigilancia de agentes cuya transmisión depende de vectores.

La interacción con fauna silvestre tampoco puede interpretarse como una relación simple en la que la fauna constituye siempre la fuente y el ganado un receptor pasivo. Los intercambios pueden producirse en diversas direcciones y dependen del patógeno, del uso del territorio, del acceso compartido a agua y alimento, de las especies presentes y de las prácticas humanas. La gestión sanitaria necesita identificar interfaces concretas, no convertir la presencia de vida silvestre en explicación automática de cada evento.

Esta perspectiva favorece una epidemiología más preventiva. En lugar de intentar adivinar la próxima pandemia, resulta más útil fortalecer vigilancia, trazabilidad, diagnóstico, bioseguridad, coordinación veterinaria y análisis de redes de movimiento; las enfermedades emergentes recuerdan que el establecimiento pecuario no es una unidad cerrada, sino un nodo conectado con otras explotaciones, mercados, mataderos, ecosistemas y comunidades.

3.3.3. Uso responsable de antimicrobianos y resistencia antimicrobiana

Pocos temas sanitarios han sufrido tanta simplificación como el uso de antimicrobianos. Reducir la resistencia antimicrobiana no significa suspender tratamientos necesarios ni aceptar que un animal enfermo permanezca sin atención. Los antimicrobianos continúan siendo herramientas terapéuticas esenciales, pero su utilidad futura depende de utilizarlos con indicación clínica, selección apropiada, dosis y duración adecuadas, supervisión veterinaria y respeto por los periodos de retiro.

El capítulo vigente de la OMSA sobre uso responsable y prudente reconoce expresamente tratamiento, control y prevención de enfermedades, aunque dentro de una evaluación orientada a proteger salud animal y humana y contener los riesgos de resistencia (OMSA, 2025). Esta formulación evita dos extremos: considerar cualquier uso como aceptable o presentar la eliminación indiscriminada de antimicrobianos como objetivo independiente del bienestar.

La prevención sanitaria constituye una de las formas más sólidas de disminuir la necesidad de tratamientos. Vacunación, ventilación, nutrición, densidades apropiadas, reducción del estrés, diagnóstico temprano, bioseguridad y manejo de grupos pueden reducir la incidencia de determinadas enfermedades; cuando el cuadro clínico aparece, el diagnóstico y la prescripción permiten escoger mejor la intervención. Dejar de tratar sin corregir las causas que sostienen la enfermedad puede reducir momentáneamente el consumo de medicamentos, pero deteriorar salud y bienestar.

La resistencia surge por selección y circulación de microorganismos resistentes y genes de resistencia, de modo que la vigilancia no debería limitarse a contabilizar cantidades de producto utilizado. Necesita integrar patrones de uso, sensibilidad antimicrobiana, especies bacterianas, poblaciones animales, alimentos y ambiente. El Codex revisó en 2021 su Código de prácticas para reducir y contener la resistencia antimicrobiana transmitida por los alimentos, reforzando precisamente el enfoque de cadena alimentaria (Codex Alimentarius Commission, 2021).

Los residuos constituyen un problema relacionado pero distinto. Un alimento puede contener residuos por encima de límites permitidos sin que ello demuestre necesariamente resistencia en los microorganismos presentes, mientras una bacteria resistente puede circular aunque no existan residuos detectables del fármaco original. Respetar periodos de retiro y límites regulatorios protege la inocuidad; la gestión de resistencia exige, además, vigilancia microbiológica y administración prudente.

Las alternativas tampoco deberían presentarse como sustitutos universales. Vacunas, probióticos, mejoras de instalaciones, selección genética, nutrición de precisión y otras estrategias pueden reducir determinadas necesidades terapéuticas, pero su eficacia depende del agente, especie, fase productiva y sistema. La meta razonable consiste en reducir usos innecesarios mientras se conserva capacidad para tratar correctamente a los animales que lo necesitan.

3.4. Una sola salud en un sistema compartido

3.4.1. Las conexiones entre animales, personas y ambiente

One Health adquiere valor cuando permite comprender problemas que pierden información al analizarse desde un solo sector. El One Health High-Level Expert Panel definió el enfoque como una estrategia integrada destinada a equilibrar y optimizar de manera sostenible la salud de personas, animales y ecosistemas, reconociendo sus interdependencias (OHHLEP, 2022). La definición es importante, aunque su utilidad en producción pecuaria aparece sobre todo al traducirla a decisiones concretas.

La resistencia antimicrobiana ofrece un ejemplo evidente: el medicamento puede administrarse a un animal, las bacterias seleccionadas circular dentro de la explotación y determinados microorganismos o genes desplazarse mediante animales, personas, alimentos, estiércol, agua o ambiente. Ningún ministerio, laboratorio o productor observa por sí solo todas esas rutas. Una situación similar aparece en algunas zoonosis, donde la vigilancia veterinaria puede detectar cambios en animales antes de que se acumulen casos humanos, mientras los sistemas de salud pública aportan información sobre exposiciones ocupacionales o alimentarias.

El ambiente no debe incorporarse únicamente como receptor final de impactos. Agua, suelo, vectores, biodiversidad y clima intervienen activamente en múltiples ciclos epidemiológicos; gestionar estiércol, aguas residuales, cadáveres o fauna sin considerar esas conexiones puede desplazar el riesgo de un componente hacia otro. One Health no elimina la especialización disciplinaria, pero obliga a compartir información suficiente para que las decisiones de un sector no generen consecuencias inadvertidas sobre los demás.

3.4.2. Zoonosis e inocuidad dentro de las cadenas pecuarias

Una zoonosis puede transmitirse por contacto directo, alimentos, agua, ambiente o vectores según el agente implicado. La Organización Mundial de la Salud recuerda que existen más de doscientas zoonosis conocidas y que los patógenos zoonóticos pueden ser bacterianos, virales, parasitarios u otros agentes (OMS, 2020). El dato adquiere significado productivo cuando se observa la cadena completa: granja, transporte, procesamiento, almacenamiento, distribución, preparación y consumo.

En la granja, sanidad de los animales, agua, alimentación, bioseguridad y manejo de estiércol condicionan parte del riesgo inicial. Durante transporte y faenamiento pueden aparecer contaminación cruzada y nuevas oportunidades de dispersión, mientras el procesamiento introduce controles capaces de reducir peligros si se aplican correctamente. El consumidor constituye el último eslabón, pero no debería cargar con la responsabilidad de corregir fallas generadas anteriormente.

FAO sitúa la inocuidad de los alimentos dentro de One Health y mantiene el principio de control desde la producción hasta el consumo, en coordinación con Codex Alimentarius (FAO et al., 2022). Esa visión permite separar dos ideas que suelen mezclarse: un animal con buen bienestar no garantiza automáticamente un alimento inocuo y un alimento microbiológicamente seguro no demuestra que el animal haya tenido buen bienestar. Ambos objetivos comparten factores y pueden reforzarse, pero necesitan indicadores y controles propios.

3.4.3. One Health como marco para la toma de decisiones

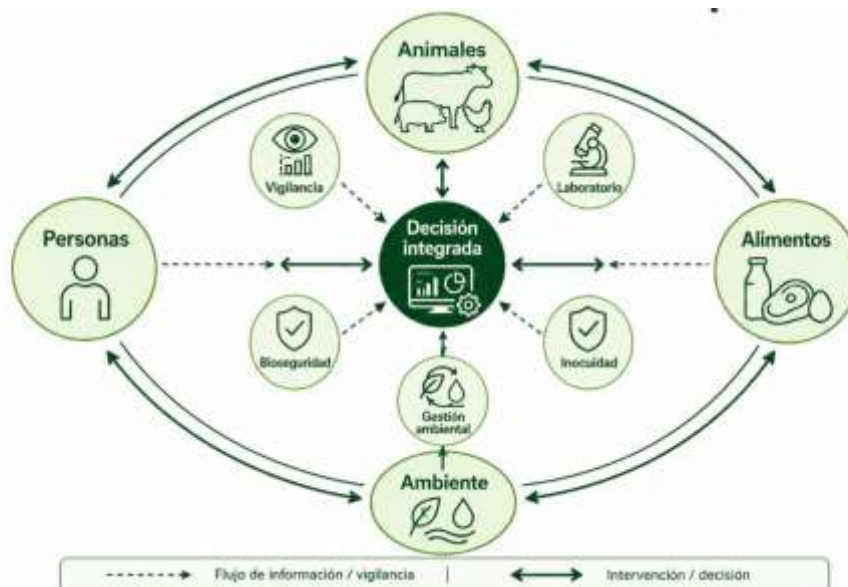
El principal riesgo de One Health es convertirlo en una etiqueta que acompaña documentos sin modificar la forma de decidir. Su aplicación real necesita intercambio de datos, responsabilidades definidas, interoperabilidad entre sistemas de vigilancia, mecanismos de alerta y capacidad para actuar conjuntamente. El Plan de Acción Conjunto One Health 2022–2026 elaborado por FAO, UNEP, OMS y OMSA organiza precisamente la implementación alrededor de capacidades sanitarias, zoonosis emergentes y endémicas, seguridad alimentaria, resistencia antimicrobiana y dimensión ambiental (FAO et al., 2022).

La dificultad aparece cuando esas responsabilidades pertenecen a instituciones con presupuestos, competencias, bases de datos y prioridades diferentes. Un servicio veterinario puede registrar eventos en animales utilizando categorías que no se integran con las de salud humana; la autoridad ambiental puede disponer de información territorial que llega tarde al análisis epidemiológico, mientras productores y laboratorios privados generan datos valiosos que permanecen fuera de los sistemas públicos.

Aplicar One Health exige, por ello, decidir qué información debe compartirse, quién la interpreta, cuándo se activa una alerta y qué institución coordina la respuesta. No todos los problemas necesitan una estructura interministerial permanente, pero aquellos que atraviesan claramente las interfaces animal-persona-ambiente difícilmente pueden gestionarse mediante actuaciones aisladas.

Figura 10.

Interfaz One Health en la cadena pecuaria



3.5. Bienestar animal, mercado y legitimidad social

3.5.1. Lo que demandan consumidores, normas y cadenas comerciales

El bienestar animal dejó de ser una discusión confinada a veterinarios y especialistas en comportamiento. Compradores institucionales, supermercados, exportadores, procesadores, organismos reguladores y consumidores incorporan gradualmente requisitos relacionados con alojamiento, transporte, procedimientos y sacrificio. Esto puede transformar prácticas productivas, aunque la presión no es homogénea entre países, productos ni grupos sociales.

Las actitudes de los consumidores requieren especial cautela. Gran parte de la literatura procede de Europa o Norteamérica, donde ingreso, regulación, estructura minorista y disponibilidad de productos certificados difieren de otras regiones; trasladar directamente esos resultados a América Latina puede generar conclusiones engañosas. El trabajo de Estévez et al. (2022) resulta particularmente útil porque estudió 2852 consumidores de Argentina, Chile,

Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia y encontró segmentos diferenciados: personas altamente comprometidas con el bienestar, consumidores interesados en productores y etiquetado, grupos con preocupaciones compartidas y un segmento de menor involucramiento.

El resultado muestra que no existe un “consumidor latinoamericano” único. Cultura alimentaria, poder adquisitivo, conocimiento, empatía hacia productores, percepción del precio y confianza en etiquetas modifican las decisiones. Una persona puede valorar el bienestar y no comprar un producto certificado porque no está disponible, porque no confía en la certificación o porque su precio supera su presupuesto; por ello, las encuestas de actitudes no deberían interpretarse automáticamente como pronósticos de compra.

La propia investigación regional ha crecido de forma desigual. Gallo et al. (2022) identifican avances importantes en la producción científica latinoamericana sobre bienestar animal, pero también diferencias geográficas y temáticas que limitan la posibilidad de asumir que la evidencia disponible representa por igual todos los sistemas pecuarios de la región.

Las cadenas comerciales añaden otro incentivo. Una certificación puede facilitar acceso a determinados compradores, estandarizar procedimientos y hacer verificables ciertos requisitos; no obstante, su utilidad dependerá de qué mide, con qué frecuencia, quién audita y qué ocurre cuando los resultados no cumplen el estándar.

3.5.2. Entre la certificación y el bienestar real

Una explotación puede poseer formularios completos, protocolos firmados, instalaciones aprobadas y registros correctamente archivados sin que ello demuestre por sí solo que los animales estén experimentando un buen estado de bienestar. Este es uno de los puntos más delicados de cualquier sistema de certificación: verificar procesos es relativamente sencillo; verificar resultados biológicos y conductuales exige observar animales.

Los recursos son importantes, pero su presencia puede ocultar fallas de funcionamiento. Tener bebederos no demuestra que todos entreguen suficiente agua; disponer de cama no confirma que permanezca seca; contar con un

protocolo de analgesia no prueba que se aplique; registrar capacitación del personal tampoco garantiza una manipulación adecuada. La diferencia entre cumplimiento documental y bienestar real se vuelve visible cuando la auditoría incorpora cojera, heridas, suciedad, mortalidad, miedo, caídas, resbalones, lesiones de cola, dermatitis plantar, condición corporal u otros indicadores adecuados para cada especie.

Esta lógica coincide con la orientación contemporánea de los estándares de la OMSA, que concede preferencia a las medidas basadas en el animal cuando son factibles (OMSA, 2025). La certificación más robusta no debería preguntar únicamente “¿existe el recurso?”, sino también “¿qué resultado está produciendo?”. Cuando ambos niveles se contradicen, el estado del animal ofrece información que el documento no puede reemplazar.

Tampoco sería correcto desechar la certificación. Un buen sistema puede establecer responsabilidades, generar registros comparables, obligar a realizar controles periódicos y crear incentivos comerciales; el problema surge cuando el sello se transforma en el objetivo final. El verdadero valor aparece cuando las auditorías detectan desviaciones, activan correcciones y permiten comprobar posteriormente si la condición de los animales mejoró.

3.5.3. ¿Hasta dónde debe llegar la responsabilidad del sistema productivo?

La responsabilidad sobre el bienestar se distribuye a lo largo de la cadena porque ninguna persona controla todas las condiciones que experimentará el animal. El productor administra alojamiento, alimentación, personal y una parte considerable de la salud preventiva; el veterinario aporta diagnóstico, prescripción, analgesia, vigilancia y asesoramiento; la industria condiciona especificaciones de compra, ritmos de procesamiento y requisitos contractuales; el transportista controla una etapa particularmente sensible, mientras comercializadores, Estado y consumidores influyen mediante estándares, precios, fiscalización y decisiones de compra.

Distribuir responsabilidades no significa diluirlas. La OMSA considera explícitamente el transporte como una responsabilidad compartida y distingue

funciones de propietarios, transportistas, personal, gestores de instalaciones y autoridades (OMSA, 2026). El mismo razonamiento puede extenderse al resto de la cadena: cada actor responde por las decisiones que efectivamente puede controlar y por la información que debe transferir al siguiente.

El productor no puede resolver por sí solo una espera excesiva generada en una planta de sacrificio; el transportista no puede corregir una cojera severa desarrollada durante meses en la explotación; una autoridad no mejora el bienestar únicamente publicando una norma si carece de mecanismos razonables de aplicación. El consumidor, finalmente, participa en las señales del mercado, pero trasladarle toda la responsabilidad mediante la elección de compra resulta igualmente limitado cuando la información es incompleta o la oferta no permite comparar condiciones de producción.

La responsabilidad compartida adquiere sentido cuando existen trazabilidad y retroalimentación. Lesiones observadas durante el sacrificio pueden devolver información al productor; problemas registrados en transporte pueden modificar procedimientos de carga; aumentos de enfermedad pueden impulsar cambios en alojamiento, vacunación o bioseguridad. La cadena deja entonces de operar como una sucesión de actores independientes y comienza a funcionar como un sistema capaz de aprender de sus propios resultados.

Este aprendizaje abre una dificultad adicional. Muchas variables importantes continúan dependiendo de inspecciones puntuales: el evaluador visita la explotación, observa una muestra de animales y obtiene una fotografía temporal de una realidad que cambia durante las veinticuatro horas del día. Una vaca puede alterar su patrón de descanso antes de mostrar signos clínicos evidentes; un grupo de cerdos puede modificar su actividad durante las horas en las que no existe personal presente; las aves pueden comenzar a distribuirse de manera anormal dentro del galpón mucho antes de que aumente la mortalidad. El siguiente paso de la producción pecuaria consiste precisamente en ampliar la capacidad de observación.

Sensores de actividad, micrófonos, cámaras, dispositivos térmicos y registros automáticos permiten recoger información con una frecuencia imposible para la inspección humana permanente. La ganadería de precisión comienza a utilizar

estas señales para identificar cambios de comportamiento, locomoción, alimentación, temperatura y otras variables relacionadas con salud y bienestar. Morgan et al. (2024) muestran este potencial incluso en pequeños rumiantes, aunque recuerdan que la diversidad de ambientes y sistemas productivos sigue planteando desafíos de validación.

La tecnología no elimina la necesidad de comprender al animal; la vuelve más exigente. Un algoritmo puede detectar una desviación solamente si las variables medidas poseen significado biológico y si el modelo ha sido validado bajo condiciones comparables. La inteligencia artificial y la visión computacional amplían la escala de observación, pero los sensores continúan midiendo señales, no bienestar en abstracto. El desafío que sigue es convertir ese flujo de datos en información interpretable y decisiones oportunas sin confundir automatización con conocimiento. Ese será el punto de partida del próximo capítulo.

**Capítulo IV. De la ganadería de precisión a los sistemas
pecuarios inteligentes**

De la ganadería de precisión a los sistemas pecuarios inteligentes

La digitalización de la producción animal suele describirse mediante imágenes de animales equipados con collares, cámaras instaladas sobre corrales y algoritmos capaces de procesar miles de registros en pocos segundos. Esa representación es parcialmente correcta, pero deja fuera la pregunta que determina si una tecnología tiene valor productivo: qué problema permite resolver y si la información que genera modifica una decisión de manera suficientemente confiable como para justificar su costo, mantenimiento y complejidad. Un sensor que produce datos no convierte por sí mismo una explotación en un sistema inteligente; tampoco una plataforma que clasifica comportamientos mediante aprendizaje automático garantiza mejores resultados sanitarios, productivos o de bienestar. La utilidad aparece cuando la medición representa adecuadamente el fenómeno biológico, el sistema resiste las condiciones reales de la explotación y la información llega a una persona capaz de interpretarla y actuar.

La revisión de Yin et al. (2026) muestra hasta qué punto se ha ampliado la capacidad de obtener información individual mediante acelerómetros, sensores térmicos, ópticos, acústicos y otros dispositivos portátiles. El mismo trabajo identifica obstáculos menos visibles en las demostraciones tecnológicas: estabilidad durante periodos prolongados, consumo energético, comodidad del dispositivo, biocompatibilidad, costo y resistencia física. La distancia entre un prototipo funcional y una herramienta pecuaria útil se encuentra precisamente en esos detalles. La sofisticación tecnológica puede ampliar la capacidad de observar al animal, pero el conocimiento zootécnico, veterinario y territorial continúa siendo necesario para decidir qué observar, cuándo intervenir y cuáles cambios tienen importancia biológica.

4.1. Del registro manual al animal conectado

4.1.1. Sensores y dispositivos de monitoreo

El registro manual continúa siendo una fuente relevante de información en numerosas explotaciones porque permite integrar señales que un dispositivo

aislado difícilmente reúne: apariencia del animal, interacción con el grupo, características del ambiente, respuesta al trabajador y antecedentes recientes. Su principal limitación aparece cuando se necesita observar de manera continua a decenas, cientos o miles de individuos. Allí los sensores ofrecen una ventaja clara: pueden registrar cambios durante periodos en los que ninguna persona está observando directamente al animal y construir series temporales que revelan desviaciones respecto de su propio patrón habitual.

Yin et al. (2026) describen un panorama en el que acelerómetros y unidades inerciales se utilizan para registrar movimiento y orientación; sensores térmicos y dispositivos asociados permiten seguir variaciones de temperatura; GPS y tecnologías de localización permiten conocer desplazamientos y uso espacial; mientras otros sistemas registran señales acústicas, frecuencia cardiaca, respiración o variables relacionadas con ingestión y rumia. Alimentación y consumo de agua también pueden medirse mediante equipos instalados en comederos y bebederos que combinan identificación electrónica con pesaje, flujo u otros registros. La selección tecnológica depende, por tanto, de la variable que resulte útil para el problema concreto y no de la cantidad de sensores que puedan instalarse.

Una distinción resulta esencial: medir una variable no equivale a identificar directamente un estado biológico. Un acelerómetro mide aceleraciones; el comportamiento de pastoreo, descanso o alimentación es inferido posteriormente mediante reglas o modelos que relacionan determinadas firmas de movimiento con comportamientos observados. Un micrófono registra presión acústica; que cierto segmento sea clasificado como tos requiere procesamiento adicional, y reconocer una tos tampoco establece automáticamente su etiología. De manera similar, una cámara térmica registra radiación infrarroja y permite estimar temperaturas superficiales, pero una temperatura superficial anormal no constituye por sí sola el diagnóstico de una enfermedad.

El trabajo de Versluijs et al. (2023) ilustra esa diferencia. Los autores utilizaron datos de acelerometría obtenidos mediante collares comerciales de cercado virtual en 38 bovinos de carne y entrenaron modelos para clasificar comportamientos. Bajo la configuración de mejor desempeño, las métricas

globales fueron elevadas, con *accuracy* próximas a 0,997–0,998 y valores de *precision* y *recall* también altos; sin embargo, los resultados cambiaron con el tamaño de la ventana temporal, la orientación del dispositivo y el comportamiento evaluado. El sensor había medido movimiento de forma continua; fue el modelo entrenado con observaciones previamente etiquetadas el que transformó ese movimiento en categorías conductuales.

Algo similar ocurre con la rumia. Hoffmann et al. (2024) evaluaron un enfoque automatizado para registrar este comportamiento y encontraron diferencias importantes entre los datos brutos y los datos corregidos cuando existían interrupciones en la transmisión. En una de las validaciones, la sensibilidad calculada sobre los registros sin corregir fue de aproximadamente 60,1 %, mientras que, al considerar los periodos perdidos por problemas de transmisión, alcanzó 99,1 %; la especificidad correspondiente fue de 91,7 % y 87,8 %. El ejemplo advierte contra la interpretación de una única cifra aislada: la calidad de una inferencia depende tanto del algoritmo como de la integridad del dato que lo alimenta.

La consecuencia práctica es relevante. Antes de adquirir un dispositivo conviene saber qué señal física registra, qué indicador deriva de ella, mediante qué población fue validado y qué comportamiento tendrá cuando cambien la raza, el sistema de alojamiento, el tipo de pastoreo o la disponibilidad de conectividad. El “animal conectado” no debe entenderse como un animal cuyas condiciones biológicas son conocidas en todo momento, sino como un individuo del que se reciben algunas señales con una resolución temporal mayor que la alcanzable mediante observación ocasional.

4.1.2. Internet de las cosas dentro de la explotación

Cuando varios sensores comienzan a producir información, el desafío deja de ser únicamente medir. Los datos deben salir del dispositivo, llegar a algún punto de comunicación, almacenarse, procesarse y finalmente presentarse de una manera comprensible. Esa cadena constituye una de las aplicaciones pecuarias del Internet de las cosas o IoT.

Ozger et al. (2024) explican esta arquitectura mediante capas conectadas que permiten a los dispositivos recoger información y compartirla con sistemas de

procesamiento. En una explotación, el recorrido puede simplificarse de la siguiente manera: animal o ambiente → sensor → red local o gateway → infraestructura de comunicación → almacenamiento → plataforma de análisis → alerta o visualización → decisión. El *gateway* funciona como intermediario entre dispositivos situados cerca de los animales y una red de mayor alcance; la información puede procesarse parcialmente de forma local o enviarse a servidores y servicios en la nube.

No toda explotación necesita la misma arquitectura. En instalaciones intensivas con conectividad estable, el envío frecuente de información a servicios remotos puede ser viable. En áreas extensivas o zonas rurales con cobertura irregular, conservar parte del procesamiento local, transmitir únicamente eventos importantes o sincronizar los datos cuando reaparece la señal puede resultar más apropiado que diseñar un sistema dependiente de conexión permanente. El trabajo de Greig et al. (2023) con productores bovinos confirma que el acceso a Internet y la percepción de complejidad tecnológica forman parte de las barreras que condicionan la adopción de herramientas de ganadería de precisión.

La conectividad es, por ello, una condición productiva y no únicamente informática. Un sistema de alerta sanitaria pierde parte de su utilidad si transmite la información varias horas después del evento; otro destinado a analizar desplazamientos semanales podría funcionar correctamente bajo ese mismo retraso. Diseñar una explotación conectada requiere establecer primero cuánto tiempo puede transcurrir entre la aparición de una señal y la decisión correspondiente.

Figura 11.

Arquitectura funcional de una explotación pecuaria conectada



4.1.3. Datos continuos frente a observaciones puntuales

La observación puntual responde a una pregunta concreta sobre un momento determinado; el registro continuo permite reconstruir cómo se llegó hasta allí. Esta diferencia puede ser decisiva frente a procesos que comienzan con cambios discretos. La reducción progresiva de la rumia, una modificación del tiempo dedicado a comer o un desplazamiento diferente al habitual podrían aparecer antes de que un trabajador identifique un signo clínico evidente. La principal aportación del monitoreo continuo no consiste, entonces, en sustituir la observación humana, sino en multiplicar las oportunidades de detectar cambios.

La continuidad también genera problemas que un cuaderno de campo rara vez presenta en la misma escala. Un dispositivo puede desplazarse sobre el cuerpo, quedarse sin batería, perder paquetes de datos, romperse, saturarse de suciedad o producir lecturas anómalas. En una explotación con cientos de animales, incluso una tasa aparentemente pequeña de falsos positivos puede producir suficientes alertas diarias como para que el personal comience a ignorarlas. La revisión de Yin et al. (2026) identifica precisamente estabilidad, duración energética, resistencia, comodidad y calidad de la señal entre los retos que persisten en sensores destinados a animales.

La calibración tampoco es un trámite único. El comportamiento de un sensor puede cambiar con la ubicación en el animal, las condiciones ambientales y el deterioro físico; al mismo tiempo, el comportamiento que intenta reconocer también varía con edad, estado fisiológico, sistema de alojamiento o manejo. Cuando se entrenan algoritmos sobre datos obtenidos en una población concreta, esa relación entre señal y estado puede no trasladarse intacta a otra explotación.

Los datos continuos poseen valor cuando reducen una incertidumbre relevante para el manejo. Registrar millones de observaciones sin un criterio para priorizarlas puede aumentar la carga de trabajo en vez de disminuirla. La buena ganadería de precisión no es la que almacena más datos, sino la que conserva los datos suficientes para responder preguntas productivas definidas y permite reconocer cuándo la señal es demasiado incierta para fundamentar una intervención.

4.2. Ver, escuchar y anticipar lo que ocurre en la granja

4.2.1. Visión computacional y reconocimiento automático de animales

Las cámaras presentan una característica que las distingue de numerosos sensores portátiles: pueden observar varios animales sin colocar físicamente un dispositivo sobre cada uno. Esto reduce algunos problemas de batería, pérdida y molestias, aunque introduce otros relacionados con iluminación, oclusiones, suciedad de la lente, densidad animal y posición de la cámara.

La revisión de Islam et al. (2026) reúne aplicaciones de cámaras RGB convencionales, sensores de profundidad y sistemas térmicos para monitorizar salud y bienestar bovino. Las cámaras RGB capturan información visible y resultan útiles para detección e identificación, seguimiento, postura y comportamiento; los sistemas de profundidad agregan información tridimensional que puede apoyar estimaciones morfológicas, de peso o condición corporal, mientras que las cámaras térmicas permiten evaluar patrones de temperatura superficial. Los autores muestran resultados elevados en distintas tareas de investigación, pero también identifican problemas de generalización,

variaciones ambientales y necesidad de integrar conocimiento veterinario y zootécnico con el desarrollo computacional.

Reconocer automáticamente un animal exige separar varias operaciones que a veces se presentan como una sola. Primero debe detectarse que existe un animal en la imagen; después puede necesitarse segmentar su silueta, identificar al individuo, seguirlo entre cuadros sucesivos y finalmente extraer una característica relevante. Una cámara instalada para reconocer vacas no “observa” la explotación como lo hace una persona; transforma matrices de píxeles en representaciones numéricas que un modelo utiliza para resolver una tarea definida.

La visión computacional ha mostrado utilidad experimental en locomoción y cojera. Barney et al. (2023) emplearon estimación de pose mediante aprendizaje profundo para analizar bovinos y reportaron, en su conjunto de validación, 100 % de *accuracy* para detección de cojera y 94 % para clasificación de severidad, con un coeficiente kappa de Cohen de 0,8782, *precision* de 0,8650 y *recall* de 0,9209 en la clasificación de severidad. Las cifras son prometedoras dentro del experimento realizado, pero no significan que el procedimiento posea una efectividad clínica universal de 100 %. Antes de trasladarlo a otras condiciones deben considerarse tamaño y diversidad del conjunto de datos, características de las instalaciones y validación en poblaciones independientes.

4.2.2. Movimiento, conducta, sonidos y señales fisiológicas

No todos los cambios relevantes son visuales. Un animal puede modificar su patrón de actividad, emitir sonidos diferentes o alterar su comportamiento alimentario antes de que aparezca una lesión fácilmente observable. Acelerometría, bioacústica y visión pueden estudiar aspectos distintos del mismo proceso y, cuando existe una justificación biológica, complementarse.

Los resultados de Versluijs et al. (2023) muestran que las firmas de aceleración pueden diferenciar actividades bovinas con precisión elevada bajo condiciones determinadas; lo importante, sin embargo, no es solo clasificar “comiendo”, “descansando” o “caminando”, sino establecer qué cambio de esas conductas tiene relevancia para la decisión que se intenta tomar. Una reducción de actividad podría relacionarse con enfermedad, dolor, clima, disponibilidad de

alimento o simplemente con una modificación del manejo. El sensor detecta el cambio; su interpretación exige contexto.

La bioacústica ofrece otro ejemplo de esta separación entre señal e interpretación. Shen et al. (2022) combinaron características acústicas con representaciones profundas y consiguieron un *accuracy* de 97,35 % para reconocer tos porcina. Posteriormente, Yin et al. (2023) estudiaron estrategias de fusión y reportaron 99,20 % de *accuracy* en reconocimiento de tos dentro del conjunto evaluado. Ambos trabajos demuestran capacidad para identificar el evento acústico; ninguno convierte la tos, por sí sola, en un diagnóstico etiológico. El mismo sonido puede aparecer en procesos respiratorios distintos y una alerta requiere ser vinculada con prevalencia, signos clínicos, ambiente, antecedentes y, cuando corresponda, evaluación veterinaria.

Postura y locomoción proporcionan información sobre alteraciones musculoesqueléticas; duración y frecuencia de visitas al comedero pueden revelar cambios conductuales; vocalizaciones pueden asociarse con determinados eventos de estrés, dolor o interacción social; la frecuencia respiratoria puede estimarse mediante señales fisiológicas o, bajo condiciones apropiadas, mediante análisis de movimiento torácico en video. Ninguna de estas variables tiene una interpretación universal. El valor reside en combinar evidencia científica, antecedentes individuales y condiciones del sistema productivo.

4.2.3. Detección temprana de alteraciones productivas, sanitarias y de bienestar

Detectar temprano significa reconocer una señal antes de que la alteración alcance una fase que normalmente desencadenaría la intervención. Esto plantea un desafío estadístico: un sistema puede detectar muchos casos verdaderos y, simultáneamente, producir demasiadas falsas alarmas. Para evaluar esa situación no basta con mencionar que un modelo consiguió “95 %”.

Tabla 9.

Lectura práctica de las principales métricas utilizadas en modelos pecuarios

Métrica	Qué expresa	Precaución al interpretarla
<i>Accuracy</i>	Proporción total de clasificaciones correctas	Puede resultar elevada cuando una clase es mucho más frecuente que otra
<i>Precision</i>	Entre las alertas clasificadas como positivas, cuántas correspondieron realmente a positivos	Una <i>precision</i> baja implica numerosas falsas alarmas
<i>Recall</i> o sensibilidad	Entre los positivos reales, cuántos fueron detectados	Una sensibilidad alta puede alcanzarse a costa de generar más falsos positivos
Especificidad	Entre los negativos reales, cuántos fueron correctamente reconocidos	Importa cuando una falsa alarma tiene costos o provoca intervenciones innecesarias
F1	Media armónica entre <i>precision</i> y <i>recall</i>	Resume ambas métricas, pero no reemplaza su análisis separado
AUC	Capacidad de discriminación del modelo a través de distintos umbrales	No informa por sí sola qué umbral resulta productivamente conveniente
MAE	Magnitud media absoluta del error en una predicción continua	Debe interpretarse en las unidades de la variable
RMSE	Error cuadrático medio con mayor penalización de errores grandes	Dos modelos con RMSE diferente pueden tener consecuencias prácticas similares o distintas según el problema

La sensibilidad responde a cuántos casos reales consigue encontrar el sistema; la especificidad indica con qué eficacia descarta a quienes no presentan la condición. La *precision*, en sentido técnico, responde a otra pregunta: qué proporción de las alertas positivas corresponde realmente a positivos. Estas diferencias son especialmente importantes cuando la condición estudiada es poco frecuente. Un algoritmo puede mostrar buen desempeño global y aun así generar demasiadas alertas para que el productor pueda atenderlas.

La validación externa constituye otro filtro necesario. Un modelo probado con animales de la misma explotación que proporcionó los datos de entrenamiento puede aprender características particulares de ese entorno. La prueba más exigente consiste en mantener el desempeño cuando cambian instalaciones, cámaras, razas, condiciones de iluminación, dietas, estaciones o personal. La literatura reciente de visión computacional reconoce esta transferencia entre

dominios como uno de los obstáculos para trasladar modelos de laboratorio o de una única granja hacia aplicaciones generalizadas.

Figura 12.

De la señal biológica a una decisión verificable

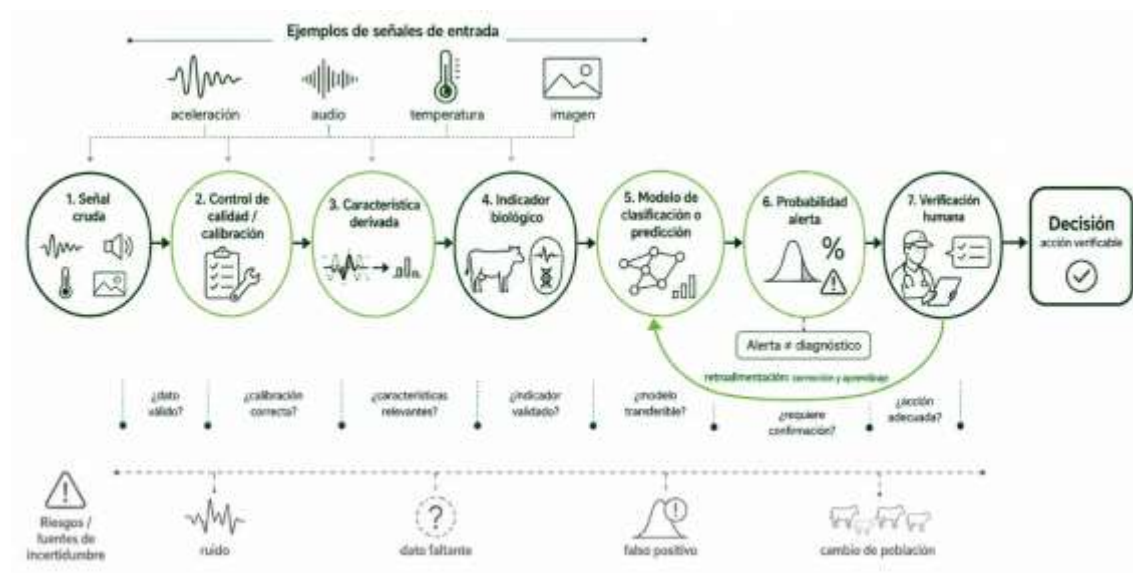
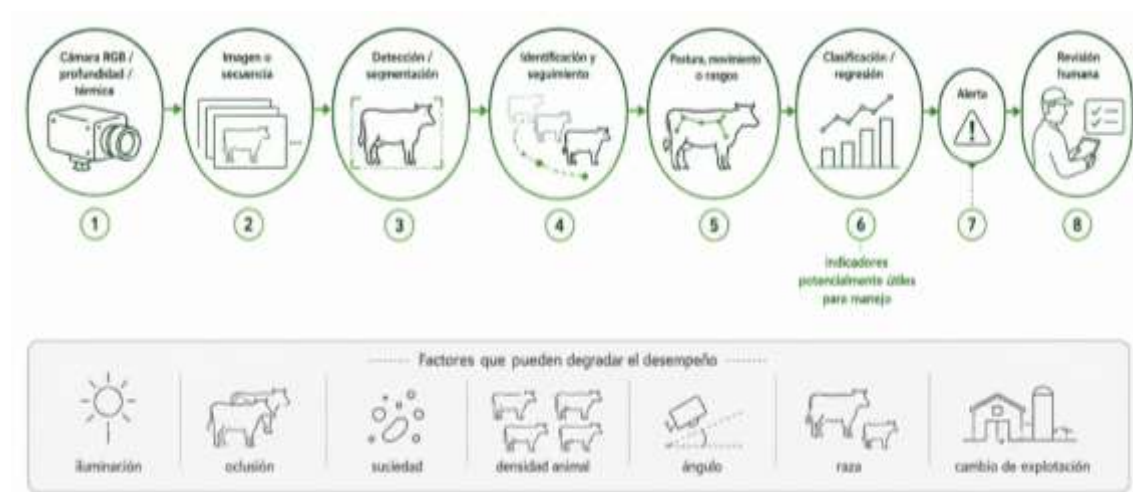


Figura 13.

Arquitectura de un sistema de visión computacional para producción animal



4.3. Cuando los datos comienzan a tomar parte en las decisiones

4.3.1. Inteligencia artificial y aprendizaje automático

La inteligencia artificial reúne métodos muy diversos y no debe utilizarse como sinónimo de sensor, automatización o robot. Un sensor puede funcionar sin inteligencia artificial; una máquina puede ejecutar automáticamente una secuencia programada sin aprender de los datos, y un modelo de aprendizaje automático puede producir una predicción sin controlar físicamente ningún equipo.

En el **aprendizaje supervisado**, el modelo recibe ejemplos cuya respuesta correcta ha sido previamente establecida. Si se pretende reconocer cojera, comportamiento alimentario o presencia de una determinada señal, el conjunto de entrenamiento necesita etiquetas obtenidas mediante un procedimiento de referencia. La calidad de esas etiquetas limita lo que el modelo puede aprender: un algoritmo entrenado con observaciones inconsistentes puede reproducir esa inconsistencia con gran eficiencia computacional.

La clasificación asigna observaciones a categorías —por ejemplo, caminando/descansando o alerta/no alerta—; la regresión estima valores continuos, como producción láctea o peso. Las redes neuronales constituyen familias de modelos capaces de aprender relaciones no lineales, mientras que el aprendizaje profundo utiliza arquitecturas con múltiples capas y ha resultado especialmente relevante para imágenes, audio y series temporales. Su capacidad para aprender representaciones complejas explica parte de su desempeño, pero también puede dificultar la interpretación de por qué una observación fue clasificada de determinada manera.

El problema pecuario no termina cuando el algoritmo produce una probabilidad. El umbral elegido para activar una alerta determina cuántos animales serán revisados, cuántos casos podrían pasar inadvertidos y qué carga de trabajo recibirá el personal. La utilidad del aprendizaje automático depende, en consecuencia, de su integración con un protocolo de manejo.

4.3.2. Predicción de producción, reproducción y enfermedad

Predecir significa estimar un resultado futuro a partir de información disponible en el presente. Vergani et al. (2024) evaluaron modelos para predecir producción diaria de leche en 502 vacas Holstein y mostraron que incorporar valores genómicos de cría podía mejorar la predicción dentro del conjunto estudiado. El

ejemplo es útil porque vincula información histórica, fenotípica y genética, pero no convierte la predicción en una garantía sobre la producción individual: sigue siendo una estimación condicionada por los datos y la población del modelo.

La enfermedad plantea una dificultad adicional. Satola y Satola (2024) compararon modelos individuales y métodos de ensamble para predecir mastitis subclínica en bovinos lecheros, mostrando cómo distintas estrategias de aprendizaje automático pueden producir desempeños diferentes según el conjunto de variables y la forma de combinar los modelos. Estos sistemas pueden priorizar animales para evaluación, pero una predicción de riesgo no equivale al diagnóstico veterinario ni identifica automáticamente el agente causal.

En reproducción, la lógica es comparable. Cambios de actividad, rumia u otros indicadores pueden contribuir a estimar momentos de interés reproductivo, aunque la interpretación debe contemplar otros procesos capaces de modificar esas mismas señales. Mura et al. (2026) documentan aplicaciones de sensores e IoT en actividad, reproducción, nutrición y bienestar de ovinos lecheros y subrayan, al mismo tiempo, barreras económicas y de interoperabilidad que condicionan la aplicación en explotaciones de menor escala.

Conviene mantener tres conceptos separados:

- **Predicción:** estima la probabilidad de que un evento ocurra posteriormente.
- **Detección:** identifica una señal o evento que probablemente está ocurriendo.
- **Diagnóstico:** determina clínicamente la presencia y, cuando corresponde, naturaleza de una condición mediante evidencia suficiente.

Confundirlos puede producir decisiones innecesarias o retrasar una evaluación profesional. Una vaca clasificada como de alto riesgo requiere observación y, dependiendo del problema, evaluación diagnóstica; el algoritmo no adquiere por ello la condición de veterinario digital.

4.3.3. Modelos digitales y gemelos virtuales del sistema pecuario

Un gemelo digital es más que una simulación almacenada en una computadora. El concepto supone una representación digital del sistema físico que se actualiza mediante datos procedentes de ese sistema y permite analizar su estado o explorar escenarios. En aplicaciones avanzadas puede existir una relación continua entre el objeto físico y su representación digital.

La madurez real en producción animal todavía es limitada. Symeonaki et al. (2024) revisaron los desarrollos recientes de gemelos digitales vinculados a sistemas pecuarios y situaron estas aplicaciones en etapas tempranas, con posibilidades en supervisión, modelización y toma de decisiones, pero con cuestiones abiertas relacionadas con integración de datos, infraestructura y validación.

La revisión sistemática de Hasan et al. (2024) llega a una conclusión compatible: existen propuestas relacionadas con ambiente, alimentación, emisiones, comportamiento y planificación, aunque la literatura sigue siendo limitada y muchas aplicaciones carecen de evaluación amplia bajo condiciones comerciales reales. Un modelo que simula crecimiento o producción no debe llamarse automáticamente gemelo digital; se requiere una conexión suficientemente actualizada con el sistema físico y capacidad para representar su evolución.

El interés de estos modelos podría ser importante allí donde varias fuentes de datos necesitan interpretarse simultáneamente. Una explotación lechera, por ejemplo, podría integrar información de producción, alimentación, ambiente, reproducción y salud para analizar escenarios antes de modificar una estrategia. Lo que todavía no permite la evidencia es afirmar que ese nivel de integración constituya una práctica generalizada en la producción animal.

4.4. Automatizar la granja

4.4.1. Alimentación y ordeño automatizados

El ordeño automático representa una de las aplicaciones con mayor madurez comercial dentro de la automatización pecuaria. A diferencia de numerosos prototipos de inteligencia artificial, los sistemas automáticos de ordeño operan desde hace años en explotaciones comerciales y producen grandes volúmenes de información sobre eventos de ordeño, producción y comportamiento de visita.

Ozella et al. (2023) revisaron los enfoques de modelización aplicados a datos recogidos por sistemas automáticos de ordeño y encontraron aplicaciones relacionadas con salud, producción, comportamiento y manejo. Este desarrollo muestra cómo una tecnología inicialmente orientada a ejecutar una tarea física se convierte también en infraestructura de datos.

Automatizar el ordeño no elimina el trabajo; modifica su contenido. Disminuyen determinadas tareas rutinarias asociadas con horarios fijos y aumenta la necesidad de supervisar animales que no acuden al equipo, responder alarmas, mantener sensores, revisar calidad de datos y gestionar el tránsito dentro de la instalación. El resultado sobre productividad o bienestar depende de cómo se configure el sistema, del diseño de circulación, la alimentación, la adaptación de los animales y la capacidad del personal para utilizar la información.

En alimentación se encuentran equipos comerciales para suministro automatizado, dosificación y aproximación del alimento, aunque la diversidad de explotaciones hace que su aplicabilidad sea desigual. En un establecimiento con gran cantidad de animales confinados, el ahorro de trabajo y la repetibilidad pueden justificar inversiones que no tienen sentido económico en una pequeña unidad familiar. Automatizar una operación porque técnicamente es posible no constituye por sí mismo una mejora productiva.

4.4.2. Robótica aplicada al manejo y monitoreo

La robótica pecuaria es menos extensa que algunas representaciones futuristas sugieren. Existen aplicaciones consolidadas o comercialmente disponibles en ordeño, empuje y distribución de alimento, limpieza de instalaciones y

determinadas tareas de monitoreo; otras propuestas, como plataformas móviles capaces de realizar múltiples inspecciones autónomas o interactuar con animales bajo condiciones complejas, continúan en desarrollo o validación experimental.

Una frontera cercana entre automatización y manejo digital se observa en el cercado virtual. Los collares comerciales utilizados por Versluijs et al. (2023) incorporaban localización y acelerometría dentro de un sistema capaz de gestionar límites espaciales sin una barrera física convencional. Que el hardware sea comercial no implica que todas las aplicaciones derivadas de sus datos estén igualmente validadas: los algoritmos de clasificación conductual evaluados por los autores corresponden a una capa analítica distinta.

Esta diferencia de madurez dentro de un mismo sistema merece atención. Una explotación puede utilizar un robot comercial ampliamente probado y, simultáneamente, añadir sobre sus datos un modelo experimental para predecir enfermedad. La condición comercial del primero no se transfiere al segundo.

4.4.3. Qué cambia para el trabajador y para el animal

La automatización redistribuye el trabajo desde la ejecución repetitiva hacia la vigilancia de excepciones. El trabajador que antes recorría corrales para identificar determinados cambios puede comenzar la jornada revisando un panel de alertas y priorizando animales. Esto puede liberar tiempo para tareas de mayor valor, pero también crea nuevas responsabilidades: comprender indicadores, reconocer errores del sistema, efectuar mantenimiento y decidir cuándo ignorar una recomendación automatizada.

Tuytens et al. (2022) identificaron doce riesgos potenciales de la ganadería de precisión para el bienestar animal, entre ellos fallos técnicos, indicadores insuficientemente validados, reducción de interacción de calidad entre humanos y animales, pérdida de determinadas habilidades de manejo y situaciones en las que el sistema productivo podría terminar adaptándose a las exigencias de la tecnología. La importancia de este análisis reside en que desplaza la discusión desde “tecnología sí o no” hacia “qué diseño, qué supervisión y qué consecuencias”.

Un sistema automatizado correctamente manejado puede ofrecer rutinas consistentes y detectar cambios que una persona no advertiría durante una inspección breve; uno mal mantenido puede introducir un nuevo foco de estrés o pasar por alto animales porque el personal confía excesivamente en las alertas. La relación humano-animal no desaparece con la digitalización, pero cambia la forma en que se distribuye la atención.

4.5. La revolución biológica también está en marcha

4.5.1. Genómica y fenotipado de precisión

La selección genética depende de la calidad con que se definen y miden los fenotipos. Durante décadas, numerosos caracteres difíciles o costosos de observar limitaron la capacidad de relacionar variación genética con desempeño individual. Los sensores y sistemas automáticos están ampliando el conjunto de rasgos que pueden registrarse repetidamente durante la vida del animal.

Upadhyay et al. (2024) analizan el fenotipado digital como una oportunidad para caracterizar comportamiento, adaptación, bienestar y desempeño con mayor resolución, aunque identifican cuellos de botella asociados con estandarización, infraestructura, calidad del dato y capacidad analítica. Obtener miles de registros no garantiza que todos representen fenotipos útiles para selección; el rasgo necesita una definición biológica consistente y una relación genética suficientemente estable.

Schokker et al. (2022) demostraron una arquitectura para trasladar rápidamente datos de sensores hacia evaluación genética de vacas lecheras mediante infraestructura en la nube. El trabajo muestra una dirección relevante: los datos que originalmente se generan para manejo diario pueden transformarse, después de procesos de control y definición de rasgos, en información para programas de mejoramiento.

La oportunidad es considerable en caracteres difíciles de medir mediante registros tradicionales, pero también lo es el riesgo de seleccionar aquello que resulta fácil de cuantificar en lugar de aquello que realmente interesa. Fenotipar con precisión no implica reducir al animal a una serie de variables; implica

mejorar la observación de rasgos biológicamente relevantes y estudiar cómo se relacionan con salud, eficiencia, resiliencia y bienestar.

4.5.2. Microbioma, biomarcadores y tecnologías ómicas

El rumen constituye un ecosistema microbiano íntimamente relacionado con digestión, aprovechamiento energético y formación de metano. Esta relación ha impulsado investigaciones que buscan identificar microorganismos, funciones metabólicas o perfiles moleculares asociados con eficiencia alimentaria, emisiones y salud.

La revisión de Badhan et al. (2025) muestra que la relación entre microbioma ruminal, eficiencia alimentaria y metano es compleja: dieta, genética del hospedador y comunidad microbiana interactúan y algunas asociaciones no han sido consistentes entre estudios. Los autores también advierten que reducir metano y aumentar eficiencia no constituyen necesariamente el mismo objetivo biológico y que una menor diversidad microbiana podría comprometer capacidad adaptativa bajo determinadas circunstancias.

Metagenómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica permiten estudiar el sistema desde niveles distintos y han ampliado la búsqueda de biomarcadores. El salto desde descubrir una asociación hasta utilizarla rutinariamente en una granja, sin embargo, es considerable. Un biomarcador candidato necesita reproducibilidad, validez analítica, relación suficientemente estable con el resultado biológico, muestras obtenibles bajo condiciones prácticas y una decisión que pueda tomarse a partir de su resultado.

La diferencia no es menor: descubrimiento de biomarcador $\neq$ prueba diagnóstica rutinaria. Parte importante de las tecnologías ómicas continúa concentrada en investigación, laboratorios especializados y estudios de validación. Su contribución actual puede ser mayor para comprender mecanismos y seleccionar candidatos que para el monitoreo cotidiano de la mayoría de explotaciones.

4.5.3. Edición genética: posibilidades que también plantean límites

La edición genética permite modificar secuencias específicas sin seguir exactamente el proceso utilizado en la transgénesis convencional. CRISPR-Cas constituye la plataforma más conocida y ha permitido explorar modificaciones asociadas con resistencia a enfermedades, características productivas y otros rasgos.

Un caso concreto se encuentra en el síndrome respiratorio y reproductivo porcino, PRRS. Liu et al. (2024) estudiaron cerdos con una modificación puntual de CD163 y documentaron resistencia frente a infección por una cepa altamente patógena de PRRSV bajo las condiciones experimentales evaluadas. Este trabajo pertenece al ámbito experimental y demuestra un efecto biológico específico; no debe confundirse por sí mismo con disponibilidad generalizada para productores.

La situación regulatoria avanzó posteriormente. El 29 de abril de 2025, la Food and Drug Administration de Estados Unidos registró la aprobación de la alteración heredable correspondiente a la eliminación del exón 7 del gen CD163 en cerdos domésticos, presentada por Genus plc, destinada a conferir resistencia al PRRSV en animales homocigotos y con posibilidad de utilizar animales y descendencia para reproducción y alimentación. La aprobación constituye un cambio objetivo en la madurez regulatoria de esta aplicación, pero no demuestra que los cerdos editados se hayan convertido en una tecnología de uso generalizado en la producción porcina mundial.

La regulación continúa siendo una dimensión central. La FDA publicó en 2024 una guía de enfoque basado en riesgo para alteraciones genómicas intencionales heredables en animales, reconociendo que diferentes modificaciones pueden presentar perfiles de riesgo distintos (FDA, 2024).

La evaluación de estas tecnologías debe incluir precisión de la edición, posibles modificaciones no deseadas, estabilidad entre generaciones, efectos pleiotrópicos, bienestar de los animales editados, bioseguridad, trazabilidad y aceptación comercial y social. Evitar una enfermedad mediante una modificación

genética podría generar beneficios sanitarios y de bienestar; esa posibilidad no elimina la necesidad de examinar consecuencias no previstas ni sustituye medidas de manejo y bioseguridad. La discusión científica tampoco debería tratar toda edición genética como si tuviera exactamente el mismo perfil de riesgo: la naturaleza de la modificación y el rasgo afectado importan.

4.6. Tecnología para quién y en qué condiciones

4.6.1. Costos, conectividad y brecha tecnológica

Una tecnología puede ser técnicamente excelente y económicamente inadecuada. Los beneficios que justifican un sistema de monitoreo en un hato de gran tamaño pueden no cubrir su costo en una pequeña explotación; del mismo modo, una herramienta diseñada para instalaciones intensivas puede aportar poco en sistemas extensivos donde el problema central sea localizar animales dispersos.

Mura et al. (2026) llaman la atención sobre esta cuestión al revisar tecnologías IoT y sistemas de apoyo a decisiones en ovejas lecheras, una actividad caracterizada en muchos territorios mediterráneos por unidades pequeñas y sistemas pastoriles. Entre las barreras señaladas aparecen costos, infraestructura, interoperabilidad y una relación beneficio-costos que no siempre está suficientemente establecida.

Greig et al. (2023) encontraron, en 137 productores bovinos encuestados, relaciones entre acceso a Internet, características percibidas de la innovación y barreras de adopción. Aunque los resultados corresponden a una población específica y no deben extrapolarse automáticamente a América Latina, muestran algo transferible como principio: la infraestructura digital forma parte de la viabilidad de la tecnología.

El precio tampoco agota el problema económico. Selvaggi et al. (2024) estudiaron preferencias de productores lecheros frente a un prototipo de podómetro y encontraron interés por modalidades que redujeran barreras de entrada, entre ellas periodos de prueba y esquemas de servicio. Esto sugiere que algunos obstáculos pueden abordarse mediante modelos de acceso diferentes de la compra completa del equipo.

Para explotaciones pequeñas o territorialmente dispersas, la innovación apropiada podría ser un sistema de menor costo, compartido entre productores, contratado como servicio o diseñado para funcionar parcialmente sin conexión permanente. La “mejor” tecnología no es necesariamente la que incorpora más funciones, sino aquella cuya información puede ser sostenida técnica y económicamente durante su vida útil.

4.6.2. Datos pecuarios: propiedad, privacidad y seguridad

Cada dispositivo digital crea una segunda producción dentro de la explotación: datos. Registros de ubicación, producción, reproducción, consumo, tratamientos o desempeño pueden tener valor para el productor, el proveedor tecnológico, empresas de genética, aseguradoras, procesadores y otros actores. Esto obliga a preguntar quién controla esos registros y bajo qué condiciones pueden utilizarse.

Reissig et al. (2024) encuestaron 939 productores suizos y encontraron que los agricultores reconocían el valor de sus datos, pero no siempre conocían en profundidad las condiciones contractuales de intercambio y expresaban inquietudes relacionadas con privacidad y confianza; los autores identificaron, además, desequilibrios de poder entre productores, proveedores tecnológicos y otros actores. Aunque la regulación suiza no representa directamente la situación latinoamericana, el estudio evidencia que la gobernanza del dato no puede reducirse a una cuestión técnica.

Antes de incorporar una plataforma conviene conocer dónde se almacenarán los datos, quién puede acceder a ellos, durante cuánto tiempo serán conservados, si el productor puede exportarlos a otro sistema, qué ocurre al finalizar la suscripción y si pueden emplearse para fines distintos de aquellos que motivaron su recolección. La portabilidad es especialmente relevante para evitar que años de información queden atrapados en un proveedor.

La ciberseguridad entra en escena cuando la producción depende de redes, servidores y dispositivos conectados. Campoverde y Luján (2025), mediante una revisión sistemática sobre agricultura inteligente, documentan amenazas y estrategias de protección que afectan distintos componentes de estos sistemas.

En una explotación pecuaria, un incidente puede comprometer confidencialidad de datos, pero también disponibilidad de servicios y funcionamiento de equipos.

Copias de seguridad, gestión de credenciales, actualización de equipos, segmentación de redes y procedimientos para continuar operaciones cuando el servicio digital falla dejan de ser detalles informáticos cuando alimentación, ordeño, identificación o alarmas dependen de esos sistemas.

4.6.3. Algoritmos, dependencia tecnológica y capacidad de decisión del productor

La dependencia tecnológica aparece cuando el sistema solo puede mantenerse, interpretarse o modificarse a través de un proveedor específico. Formatos cerrados dificultan transferir historiales; equipos incompatibles obligan a mantener varias plataformas y algoritmos opacos pueden ofrecer una recomendación sin explicar qué variables impulsaron el resultado.

Elliott y Werkheiser (2023) proponen un marco de transparencia para ganadería de precisión que no se limita a revelar el código de un algoritmo. También considera objetivos, prioridades, valores incorporados al sistema, funcionamiento, públicos afectados y barreras para comprender esa información. La transparencia útil debe permitir que alguien adopte una decisión mejor informada; publicar detalles incomprensibles no cumple necesariamente ese propósito.

Los sesgos pueden aparecer cuando una tecnología ha sido desarrollada con determinadas razas, instalaciones o formas de manejo y se utiliza después en una población diferente. También existe un riesgo menos técnico: que el trabajador pierda capacidad para reconocer señales directas porque confía cada vez más en el panel digital. Tuytens et al. (2022) incluyen esta posible erosión de habilidades entre las amenazas que deben considerarse al evaluar el efecto de la PLF sobre el bienestar.

Las entrevistas realizadas por Doidge et al. (2023) con productores de leche y cerdos muestran, además, que la digitalización afecta percepciones de identidad profesional, poder y responsabilidad. La adopción tecnológica modifica quién

interpreta la información, quién establece los umbrales y qué parte de la decisión permanece bajo control del productor.

Mantener supervisión humana no significa rechazar la automatización. Significa diseñar sistemas donde sea posible revisar una recomendación, consultar los datos que la originaron, reconocer fallos y actuar aun cuando la plataforma no esté disponible.

4.7. El sistema pecuario que viene

4.7.1. Integrar productividad, bienestar y desempeño ambiental

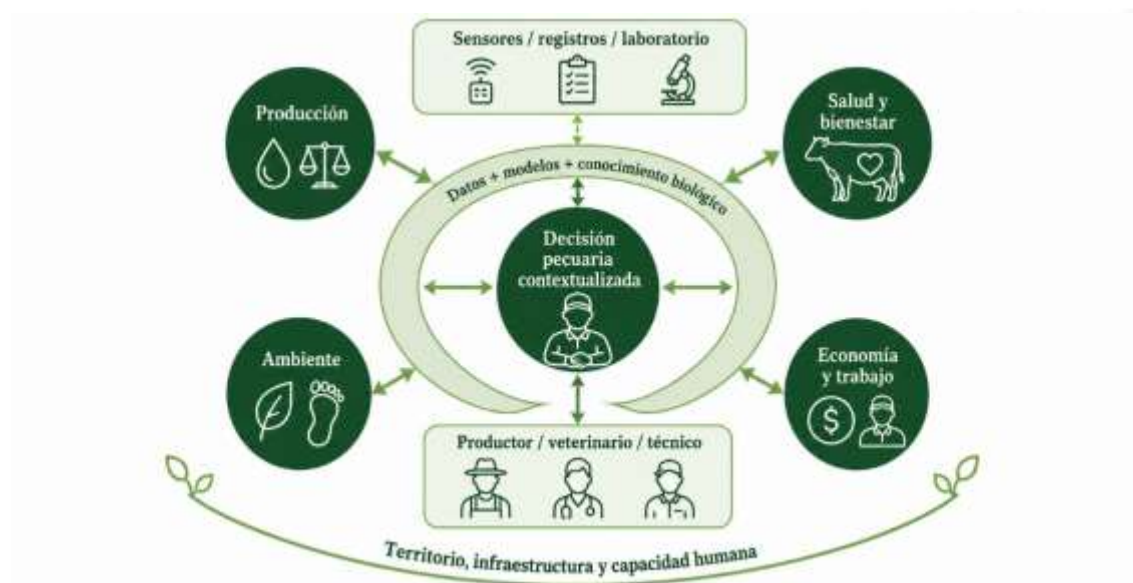
Durante años, muchas tecnologías pecuarias fueron diseñadas alrededor de una sola variable: producción de leche, consumo, peso, reproducción o ubicación. El siguiente desafío consiste en interpretar simultáneamente dimensiones que pueden avanzar en direcciones diferentes. Aumentar producción no demuestra por sí solo que el bienestar haya mejorado; reducir emisiones por unidad de producto tampoco informa completamente sobre emisiones totales, salud o uso territorial.

La integración tecnológica podría combinar información de producción con actividad, rumia, locomoción, tratamientos, ambiente, consumo, emisiones y costos. Esa arquitectura es técnicamente concebible y algunos de sus componentes ya existen, pero no constituye todavía una condición general de las explotaciones. Las revisiones sobre gemelos digitales y sistemas pecuarios conectados coinciden en que la integración de fuentes heterogéneas y la interoperabilidad continúan siendo limitaciones importantes.

El valor de reunir varias dimensiones aparece cuando permite reconocer intercambios. Una estrategia alimentaria podría mejorar conversión y reducir determinada emisión, pero aumentar costos; un cambio de alojamiento podría facilitar automatización, pero modificar interacción social o comportamiento; una selección genética favorable para producción requerirá comprobar qué ocurre con salud y longevidad. El sistema inteligente debería hacer visibles esas relaciones, no ocultarlas detrás de una puntuación única.

Figura 14.

Integración del sistema pecuario inteligente



4.7.2. Tecnologías prometedoras frente a tecnologías realmente aplicables

La madurez tecnológica no puede deducirse únicamente de la fecha de publicación ni del desempeño de un algoritmo. Algunas tecnologías llevan años operando comercialmente, otras cuentan con hardware comercial, pero mantienen funciones analíticas en validación, mientras que ciertos desarrollos existen principalmente como investigación experimental. En lugar de asignar una escala numérica arbitraria, la evidencia revisada permite clasificarlas de acuerdo con la condición expresamente documentada en las fuentes.

Tabla 10.

Madurez y condiciones de aplicación de tecnologías analizadas

Tecnología	Variable o función	Aplicación estudiada	Especie	Estado sustentado por la evidencia revisada	Limitación principal
Collares con acelerometría y GPS	Movimiento, orientación, localización	Clasificación conductual y	Bovinos	Hardware comercial; clasificación	Desempeño sensible a ventana

		gestión espacial		conductual validada en estudio específico	temporal, orientación y contexto
Sistemas automatizados de rumia	Señales relacionadas con movimientos/rumia	Registro de rumia	Bovinos lecheros	Validación experimental de sistema de registro	Pérdidas de transmisión modificaron sensibilidad y especificidad
Reconocimiento acústico de tos	Audio	Identificación automática de tos	Cerdos	Investigación experimental	Reconocer tos no equivale a diagnosticar enfermedad respiratoria
Visión profunda para cojera	Imagen y pose	Detección y clasificación de severidad	Bovinos	Investigación experimental con métricas elevadas en el conjunto estudiado	Requiere validación externa más amplia antes de generalización
Sistemas automáticos de ordeño	Ordeño, producción y múltiples datos asociados	Automatización y apoyo al manejo	Bovinos lecheros	Tecnología comercial consolidada	Inversión, manejo del tránsito, mantenimiento e interpretación de alertas
Fenotipado digital integrado con genética	Rasgos derivados de sensores	Evaluación y selección genética	Ganado lechero y otras especies	En expansión en investigación y programas especializados	Estandarización y definición biológica de fenotipos
Gemelos digitales pecuarios	Integración dinámica de múltiples datos	Simulación, monitoreo y apoyo a decisiones	Sistemas pecuarios	Aplicaciones incipientes y predominantemente de investigación	Integración, interoperabilidad y validación en granjas reales
Edición de CD163 para resistencia a PRRSV	Alteración genómica heredable	Resistencia al PRRS	Cerdos	Evidencia experimental y aprobación regulatoria específica en EE. UU. desde 2025	Adopción comercial, regulación entre jurisdicciones, aceptación y seguimiento
Sistemas IoT integrados para	Actividad, reproducción,	Apoyo al manejo	Ovinos lecheros	Aplicaciones en expansión, con	Costos, conectividad, interoperabilidad

La tabla evidencia que “digital” no constituye un nivel de madurez. El ordeño robotizado y un gemelo digital pueden aparecer juntos en una discusión sobre ganadería inteligente, aunque ocupen posiciones muy diferentes en cuanto a experiencia comercial y evidencia disponible. Algo similar ocurre con la edición genética: una aprobación regulatoria específica modifica considerablemente el estado de una aplicación, pero no permite asumir adopción extendida en otros mercados o especies.

La tecnología aplicable es aquella cuya precisión técnica se mantiene en el entorno de interés, produce información relacionada con una decisión real, dispone de mantenimiento e infraestructura y genera un beneficio compatible con su costo. Un algoritmo puede superar a otro en *accuracy* y, aun así, tener menor utilidad si requiere cámaras costosas, genera alarmas difíciles de interpretar o necesita conectividad inexistente en el territorio donde se pretende utilizar.

4.7.3. Innovar sin perder de vista al territorio, al productor y al animal

Un sistema pecuario inteligente no comienza necesariamente con la compra de tecnología. Comienza al reconocer un problema con suficiente precisión: animales enfermos detectados demasiado tarde, pérdidas de alimento, intervalos reproductivos difíciles de manejar, limitaciones de mano de obra, emisiones elevadas, problemas de bienestar o escasa información para seleccionar reproductores. Solo después tiene sentido preguntar qué combinación de conocimiento, manejo y herramientas puede reducir esa limitación.

Esta manera de plantear la innovación resulta particularmente importante en territorios donde conviven explotaciones intensivas altamente tecnificadas con ganadería familiar, pastoreo extensivo y sistemas que operan bajo restricciones de conectividad, financiación o asistencia técnica. Una solución desarrollada para miles de vacas estabuladas no debería convertirse en modelo universal de modernización pecuaria. Las necesidades de un productor que maneja animales

dispersos en grandes superficies pueden orientarse hacia localización y cercado; las de una explotación lechera intensiva quizá se concentren en ordeño, salud de ubre y alimentación, mientras que una unidad familiar podría obtener mayor beneficio de registros digitales sencillos y servicios tecnológicos compartidos que de una infraestructura compleja.

El productor tampoco debe quedar reducido a operador de alarmas. Su conocimiento del comportamiento de los animales, del clima, del territorio, de la disponibilidad de recursos y de los límites económicos proporciona información que difícilmente aparece completa en una base de datos. La supervisión humana adquiere mayor importancia a medida que los algoritmos intervienen más cerca de decisiones sanitarias, reproductivas o de bienestar. La capacidad de contradecir al sistema cuando existe evidencia suficiente es parte de una implementación responsable.

El animal permanece en el centro del proceso porque cada indicador procede, directa o indirectamente, de su biología. Un aumento de resolución digital no elimina la complejidad de esa biología. Actividad, rumia, temperatura, vocalización o postura son ventanas parciales hacia estados que dependen de múltiples causas. La tecnología puede ampliar la frecuencia y consistencia de la observación, pero una señal cuantificada no debería convertirse en sustituto automático de la interpretación biológica.

El desempeño ambiental introduce una dificultad comparable. Sistemas capaces de integrar información de alimentación, producción, microbioma, emisiones y uso de recursos podrían mejorar la comprensión de determinados intercambios, aunque todavía se requiere cautela frente a indicadores aislados. La sostenibilidad no surge de conectar sensores; depende de cómo cambian realmente los flujos de materia, energía, recursos, bienestar y resultados económicos después de utilizar la información.

La trayectoria examinada a lo largo de este capítulo muestra una ganadería que ha pasado del registro ocasional a la generación continua de datos y que comienza a combinar sensores, modelos, automatización y biología molecular. El avance es desigual. Los sistemas de ordeño automático forman parte de la práctica comercial; los dispositivos portátiles y plataformas IoT se expanden con

diferentes grados de validación; la visión computacional y la bioacústica producen resultados experimentales sólidos para tareas específicas; los gemelos digitales permanecen en fases tempranas, mientras que la edición genética presenta casos en los que investigación y regulación han avanzado con rapidez sin convertirse todavía en una solución general para la producción mundial.

Referencias Bibliográficas

- Adcock, S. J. J. (2021). Early life painful procedures: Long-term consequences and implications for farm animal welfare. *Frontiers in Animal Science*, 2, 759522. DOI: 10.3389/fanim.2021.759522.
- Alarcón, L. V., Allepuz, A., & Mateu, E. (2021). Biosecurity in pig farms: A review. *Porcine Health Management*, 7. DOI: 10.1186/s40813-020-00181-z.
- Alary, V., Lasseur, J., Frijia, A., & Gautier, D. (2022). Assessing the sustainability of livestock socio-ecosystems in the drylands through a set of indicators. *Agricultural Systems*, 198, 103389. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103389.
- Alimi, N., Assani, A. S., Worogo, H. S., Baco, N. M., & Traoré, I. A. (2024). Livestock feed resources and coping strategies during feed scarcity periods in West Africa. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1352235. DOI: 10.3389/fvets.2024.1352235.
- Alvarado Sandino, C. O., Barnes, A. P., Sepúlveda, I., Garratt, M. P. D., Thompson, J., & Escobar-Tello, M. P. (2023). Examining factors for the adoption of silvopastoral agroforestry in the Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 13, 12252. DOI: 10.1038/s41598-023-39038-0.
- Badhan, A., Wang, Y., Terry, S., Gruninger, R., Guan, L. L., & McAllister, T. A. (2025). Invited review: Interplay of rumen microbiome and the cattle host in modulating feed efficiency and methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 108(6), 5489–5501. DOI: 10.3168/jds.2024-26063.
- Barney, S., Dlay, S., Crowe, A., Kyriazakis, I., & Leach, M. (2023). Deep learning pose estimation for multi-cattle lameness detection. *Scientific Reports*, 13, 4499. DOI: 10.1038/s41598-023-31297-1.
- Brscic, M., Contiero, B., Magrin, L., Riuzzi, G., & Gottardo, F. (2021). The use of the general animal-based measures codified terms in the scientific literature on farm animal welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 634498. DOI: 10.3389/fvets.2021.634498.
- Brito, L. F., Bedere, N., Douhard, F., Oliveira, H. R., Arnal, M., Peñagaricano, F., Schinckel, A. P., Baes, C. F., & Miglior, F. (2021). Review: Genetic

selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world. *Animal*, 15(Suppl. 1), 100292. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100292.

Campoverde-Molina, M., & Luján-Mora, S. (2025). Cybersecurity in smart agriculture: A systematic literature review. *Computers & Security*, 150, 104284. DOI: 10.1016/j.cose.2024.104284.

Cartwright, S. L., Schmied, J., Karrow, N., & Mallard, B. A. (2023). Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1198697. DOI: 10.3389/fvets.2023.1198697.

Carvalho, C. B. de M., de Mello, A. C. L., da Cunha, M. V., de Oliveira Apolinário, V. X., Dubeux Júnior, J. C. B., da Silva, V. J., Medeiros, A. S., Izidro, J. L. P. S., & Bretas, I. L. (2024). Ecosystem services provided by silvopastoral systems: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 162(5), 417–432. DOI: 10.1017/S0021859624000595.

Chala, B., & Hamde, F. (2021). Emerging and re-emerging vector-borne infectious diseases and the challenges for control: A review. *Frontiers in Public Health*, 9, 715759. DOI: 10.3389/fpubh.2021.715759.

Chen, L., Thorup, V. M., Kudahl, A. B., & Østergaard, S. (2024). Effects of heat stress on feed intake, milk yield, milk composition, and feed efficiency in dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 3207–3218. DOI: 10.3168/jds.2023-24059.

Cheruiyot, E. K., Haile-Mariam, M., Cocks, B. G., & Pryce, J. E. (2022). Improving genomic selection for heat tolerance in dairy cattle: Current opportunities and future directions. *Frontiers in Genetics*, 13, 894067. DOI: 10.3389/fgene.2022.894067.

Chisoro, P., Jaja, I. F., & Assan, N. (2023). Incorporation of local novel feed resources in livestock feed for sustainable food security and circular economy. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1251179. DOI: 10.3389/frsus.2023.1251179.

Codex Alimentarius Commission. (2021). *Code of practice to minimize and contain foodborne antimicrobial resistance (CXC 61-2005, revised 2021)*. FAO/WHO.

Doidge, C., Frössling, J., Dórea, F. C., Ordell, A., Vidal, G., & Kaler, J. (2023). Social and ethical implications of data and technology use on farms: A qualitative study of Swedish dairy and pig farmers. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1171107. DOI: 10.3389/fvets.2023.1171107.

EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). (2022a). Welfare of cattle during transport. *EFSA Journal*, 20(9), e07442. DOI: 10.2903/j.efsa.2022.7442.

EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). (2022b). Welfare of pigs during transport. *EFSA Journal*, 20(9), e07445. DOI: 10.2903/j.efsa.2022.7445.

Elahi, U., Xu, C.-C., Wang, J., Lin, J., Wu, S.-G., Zhang, H.-J., & Qi, G.-H. (2022). Insect meal as a feed ingredient for poultry. *Animal Bioscience*, 35(2), 332–346. DOI: 10.5713/ab.21.0435.

Elliott, K. C., & Werkheiser, I. (2023). A framework for transparency in precision livestock farming. *Animals*, 13(21), 3358. DOI: 10.3390/ani13213358.

Estévez-Moreno, L. X., Miranda-de la Lama, G. C., & Miguel-Pacheco, G. G. (2022). Consumer attitudes towards farm animal welfare in Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, Peru and Bolivia: A segmentation-based study. *Meat Science*, 187, 108747. DOI: 10.1016/j.meatsci.2022.108747.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023a). *Contribution of terrestrial animal source food to healthy diets for improved nutrition and health outcomes: An evidence and policy overview on the state of knowledge and gaps*. FAO. DOI: 10.4060/cc3912en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023b). *Pathways towards lower emissions: A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems*. FAO. DOI: 10.4060/cc9029en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). *Drivers of supply and demand of terrestrial animal source food: An evidence and policy overview on the state of knowledge and gaps*. FAO. DOI: 10.4060/cd9125en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Environment Programme, World Health Organization, & World Organisation for Animal Health. (2022). *One Health Joint Plan of Action (2022–2026): Working together for the health of humans, animals, plants and the environment*. FAO. DOI: 10.4060/cc2289en.

Fodor, I., Spoelstra, M., Calus, M. P. L., & Kamphuis, C. (2023). A systematic review of genotype-by-climate interaction studies in cattle, pigs, and chicken. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1324830. DOI: 10.3389/fanim.2023.1324830.

Fonseca, R. P., & Sanchez-Sabate, R. (2022). Consumers' attitudes towards animal suffering: A systematic review on awareness, willingness and dietary change. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16372. DOI: 10.3390/ijerph192316372.

Gallo, C., Véjar, L., Galindo, F., Huertas, S. M., & Tadich, T. (2022). Animal welfare in Latin America: Trends and characteristics of scientific publications. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1030454. DOI: 10.3389/fvets.2022.1030454.

Goel, A. (2021). Heat stress management in poultry. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 105(6), 1136–1145. DOI: 10.1111/jpn.13496.

Govoni, C., D'Odorico, P., Pinotti, L., & Rulli, M. C. (2023). Preserving global land and water resources through the replacement of livestock feed crops with agricultural by-products. *Nature Food*, 4, 1047–1057. DOI: 10.1038/s43016-023-00884-w.

Greene, J. M., Wallace, J., Williams, R. B., Leytem, A. B., Bock, B. R., McCully, M., Kaffka, S. R., Rotz, C. A., & Quinn, J. C. (2024). National greenhouse gas emission reduction potential from adopting anaerobic digestion on

large-scale dairy farms in the United States. *Environmental Science & Technology*, 58(28), 12409–12419. DOI: 10.1021/acs.est.4c00367.

Greenwood, P. L. (2021). Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. *Animal*, 15(Suppl. 1), 100295. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100295.

Greig, J., Cavasos, K., Boyer, C., & Schexnayder, S. (2023). Diffusion of innovation, internet access, and adoption barriers for precision livestock farming among beef producers. *Advancements in Agricultural Development*, 4(3), 103–116. DOI: 10.37433/aad.v4i3.329.

Habimana, V., Nguluma, A. S., Nziku, Z. C., Ekine-Dzivenu, C. C., Morota, G., Mrode, R., & Chenyambuga, S. W. (2023). Heat stress effects on milk yield traits and metabolites and mitigation strategies for dairy cattle breeds reared in tropical and sub-tropical countries. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1121499. DOI: 10.3389/fvets.2023.1121499.

Hasan, M. K., Mun, H.-S., Ampode, K. M. B., Lagua, E. B., Park, H.-R., Kim, Y.-H., Sharifuzzaman, M., & Yang, C.-J. (2024). A systematic literature review on digital twins in livestock farming. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 12(12), 2301–2314. DOI: 10.17582/journal.aavs/2024/12.12.2301.2314.

Hoffmann, G., Strutzke, S., Fiske, D., Heinicke, J., & Mylostyvyi, R. (2024). A new approach to recording rumination behavior in dairy cows. *Sensors*, 24(17), 5521. DOI: 10.3390/s24175521.

Hollas, C. E., Rodrigues, H. C., Oyadomari, V. M. A., Bolsan, A. C., Venturin, B., Bonassa, G., Tápparo, D. C., Abilhôa, H. C. Z., da Silva, J. F. F., Michelin, W., Cavaler, J. P., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., Treichel, H., & Kunz, A. (2022). The potential of animal manure management pathways toward a circular economy: A bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(49), 73599–73621. DOI: 10.1007/s11356-022-22799-y.

- Hristov, A. N., Melgar, A., Wasson, D., & Arndt, C. (2022). Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8543–8557. DOI: 10.3168/jds.2021-21398.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Short-lived climate forcers. En *Climate change 2021: The physical science basis* (Chapter 6). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Food, fibre, and other ecosystem products. En *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (Chapter 5). Cambridge University Press.
- Islam, M. N., Edwards, J. L., Burns, R., Qi, H., & Gan, H. (2026). Computer vision for cattle health and welfare monitoring: A review of advances in imaging technology and artificial intelligence. *Sensors*, 26(13), 4271. DOI: 10.3390/s26134271.
- Kebreab, E., Bannink, A., Pressman, E. M., Walker, N., Karagiannis, A., van Gastelen, S., & Dijkstra, J. (2023). A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 106(2), 927–936. DOI: 10.3168/jds.2022-22211.
- Khan, I., Mesalam, A., Heo, Y. S., Lee, S.-H., Nabi, G., & Kong, I.-K. (2023). Heat stress as a barrier to successful reproduction and potential alleviation strategies in cattle. *Animals*, 13(14), 2359. DOI: 10.3390/ani13142359.
- Liu, F., Zhao, W., Le, H. H., Cottrell, J. J., Green, M. P., Leury, B. J., Dunshea, F. R., & Bell, A. W. (2022). Review: What have we learned about the effects of heat stress on the pig industry? *Animal*, 16(Suppl. 2), 100349. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100349.
- Liu, Y., Yang, L., Xiang, H.-Y., Niu, M., Deng, J.-C., Li, X.-Y., Hao, W.-J., Ou-Yang, H.-S., Liu, T.-Y., Tang, X.-C., Pang, D.-X., & Yuan, H.-M. (2024). Genetically modified pigs with CD163 point mutation are resistant to HP-PRRSV infection. *Zoological Research*, 45(4), 833–844. DOI: 10.24272/j.issn.2095-8137.2024.090.

- Lutz, B., Zwygart, S., Rufener, C., Burla, J.-B., Thomann, B., & Stucki, D. (2021). Data-based variables used as indicators of dairy cow welfare at farm level: A review. *Animals*, 11(12), 3458. DOI: 10.3390/ani11123458.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., Stephansen, R. B., Difford, G. F., Løvendahl, P., & Lassen, J. (2022). Selecting for feed efficient cows will help to reduce methane gas emissions. *Frontiers in Genetics*, 13, 885932. DOI: 10.3389/fgene.2022.885932.
- Martins, L. F., Cueva, S. F., Wasson, D. E., Almeida, C. V., Eifert, C., de Ondarza, M. B., Tricarico, J. M., & Hristov, A. N. (2024). Effects of dose, dietary nutrient composition, and supplementation period on the efficacy of methane mitigation strategies in dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 107(11), 9289–9308. DOI: 10.3168/jds.2024-24783.
- McClelland, S. C., Arndt, C., Gordon, D. R., & Thoma, G. (2018). Type and number of environmental impact categories used in livestock life cycle assessment: A systematic review. *Livestock Science*, 209, 39–45. DOI: 10.1016/j.livsci.2018.01.008.
- McManus, C., Pimentel, F., Junqueira, V. S., Balbino, L. C., Cordeiro, L. A. M., Bernal, F., Peripolli, V., & Ferreira, I. C. (2026). Shade matters: Heat stress alleviation in Gyr and Girolando cows through silvopastoral management in tropical conditions. *International Journal of Biometeorology*, 70(1), 27. DOI: 10.1007/s00484-025-03063-7.
- Mehre, J., Schneider, K., Jayasundara, S., Gillespie, A., & Wagner-Riddle, C. (2024). Adaptive multi-paddock grazing increases soil carbon stocks and decreases the carbon footprint of beef production in Ontario, Canada. *Journal of Environmental Management*, 371, 123255. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123255.
- 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), 1870. DOI: 10.3390/ani10101870.

- Monteiro, A. N. T. R., Brossard, L., Gilbert, H., & Dourmad, J.-Y. (2021). Environmental impacts and their association with performance and excretion traits in growing pigs. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 677857. DOI: 10.3389/fvets.2021.677857.
- Morgan-Davies, C., Tesnière, G., Gautier, J. M., Jørgensen, G. H. M., González-García, E., Patsios, S. I., Sossidou, E. N., Keady, T. W. J., McClearn, B., Kenyon, F., Caja, G., Grøva, L., Decandia, M., Csiszter, L., Halachmi, I., & Dwyer, C. M. (2024). Review: Exploring the use of precision livestock farming for small ruminant welfare management. *Animal*, 18(Suppl. 2), 101233. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101233.
- Mura, M. C., Trimasse, O., Carcangiu, V., & Luridiana, S. (2026). Precision livestock farming for dairy sheep: Applications of sensors, Internet of Things and decision support systems. *AgriEngineering*, 8(2), 58. DOI: 10.3390/agriengineering8020058.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Nutrient requirements of dairy cattle* (8th rev. ed.). The National Academies Press. DOI: 10.17226/25806.
- One Health High-Level Expert Panel. (2022). One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. *PLoS Pathogens*, 18(6), e1010537. DOI: 10.1371/journal.ppat.1010537.
- Orihuela, A. (2021). Review: Management of livestock behavior to improve welfare and production. *Animal*, 15, 100290. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100290.
- Ozella, L., Brotto Rebuli, K., Forte, C., & Giacobini, M. (2023). A literature review of modeling approaches applied to data collected in automatic milking systems. *Animals*, 13(12), 1916. DOI: 10.3390/ani13121916.
- Ozger, Z. B., Cihan, P., & Gokce, E. (2024). A systematic review of IoT technology and applications in animals. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 30(4), 411–431. DOI: 10.9775/kvfd.2024.31866.

- Picasso, V., & Pizarro, D. (2024). Silvopastoral transitions in Latin America: Toward diverse perennial systems. *Agroforestry Systems*, 98, 2267–2272. DOI: 10.1007/s10457-024-01023-5.
- Pol, F., Kling-Eveillard, F., Champigneulle, F., Fresnay, E., Ducrocq, M., & Courboulay, V. (2021). Human-animal relationship influences husbandry practices, animal welfare and productivity in pig farming. *Animal*, 15(2), 100103. DOI: 10.1016/j.animal.2020.100103.
- Pupo, M. R., Ferraretto, L. F., & Nicholson, C. F. (2025). Effects of feeding 3-nitrooxypropanol for methane emissions reduction on income over feed costs in the United States. *Journal of Dairy Science*, 108(5), 5061–5075. DOI: 10.3168/jds.2024-25502.
- Qaim, M., Barrangou, R., & Ronald, P. C. (2024). Sustainability of animal-sourced foods and plant-based alternatives. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(50), e2400495121. DOI: 10.1073/pnas.2400495121.
- Ran, Y., Lannerstad, M., Herrero, M., Van Middelaar, C. E., & De Boer, I. J. M. (2016). Assessing water resource use in livestock production: A review of methods. *Livestock Science*, 187, 68–79. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.02.012.
- Rault, J.-L., Waiblinger, S., Boivin, X., & Hemsworth, P. (2020). The power of a positive human-animal relationship for animal welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 590867. DOI: 10.3389/fvets.2020.590867.
- Reissig, L., Wiseman, L., & Cockburn, M. (2024). Farmers and their data: Evaluating the Swiss conception of data sharing through the lens of digital farming. *Journal of Rural Studies*, 111, 103390. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2024.103390.
- Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLOS ONE*, 16(3), e0247820. DOI: 10.1371/journal.pone.0247820.

- Rowe, E., & Mullan, S. (2022). Advancing a “Good Life” for farm animals: Development of resource tier frameworks for on-farm assessment of positive welfare for beef cattle, broiler chicken and pigs. *Animals*, 12(5), 565. DOI: 10.3390/ani12050565.
- Sales-Baptista, E., & Ferraz-de-Oliveira, M. I. (2021). Grazing in silvopastoral systems: Multiple solutions for diversified benefits. *Agroforestry Systems*, 95, 1–6. DOI: 10.1007/s10457-020-00581-8.
- Santos Neto, C. F. dos, Silva, R. G. da, Maranhão, S. R., Torres, A. F. F., Barbosa Filho, J. A. D., Macedo, V. H. M., & Cândido, M. J. D. (2022). Microclimate and animal thermal comfort indexes in different silvopastoral system arrangements in Caatinga. *International Journal of Biometeorology*, 66(3), 449–456. DOI: 10.1007/s00484-021-02182-1.
- Satoła, A., & Satoła, K. (2024). Performance comparison of individual and ensemble machine learning models for prediction of subclinical mastitis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 107(6), 3959–3972. DOI: 10.3168/jds.2023-24243.
- Schokker, D., Poppe, M., ten Napel, J., Athanasiadis, I. N., Kamphuis, C., & Veerkamp, R. F. (2022). Rapid turnover of sensor data to genetic evaluation of dairy cows using cloud infrastructure. *Journal of Dairy Science*, 105(12), 9792–9798. DOI: 10.3168/jds.2022-22113.
- Selvaggi, R., Pappalardo, G., Zarbà, C., & Lusk, J. L. (2024). Driving factors behind precision livestock farming tools adoption: The case of the pedometer on dairy farms. *Agricultural Systems*, 220, 104090. DOI: 10.1016/j.agsy.2024.104090.
- Shen, W., Ji, N., Yin, Y., Dai, B., Tu, D., Sun, B., Hou, H., Kou, S., & Zhao, Y. (2022). Fusion of acoustic and deep features for pig cough sound recognition. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106994. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106994.
- 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. DOI: 10.3390/ani11061483.

- Symeonaki, E., Maraveas, C., & Arvanitis, K. G. (2024). Recent advances in digital twins for livestock farming. *Applied Sciences*, 14(2), 686. DOI: 10.3390/app14020686.
- Tuytens, F. A. M., Molento, C. F. M., & Benaissa, S. (2022). Twelve threats of precision livestock farming (PLF) for animal welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 889623. DOI: 10.3389/fvets.2022.889623.
- Upadhyay, V. R., Ramesh, V., Kumar, H., Somagond, Y. M., Priyadarsini, S., Kuniyal, A., Prakash, V., & Sahoo, A. (2024). Phenomics in livestock research: Applications of digital phenotyping for animal breeding and management. *OMICS: A Journal of Integrative Biology*, 28(8), 380–393. DOI: 10.1089/omi.2024.0109.
- U.S. Food and Drug Administration. (2024). *CVM GFI #187A: Heritable intentional genomic alterations in animals: Risk-based approach*.
- U.S. Food and Drug Administration. (2025, April 29). *Freedom of Information Summary: NADA 141-609—Deletion of exon 7 of CD163 gene in domestic pigs*. FDA.
- Vargas, J., Ungerfeld, E., Muñoz, C., & DiLorenzo, N. (2022). Feeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems. *Animals*, 12(9), 1132. DOI: 10.3390/ani12091132.
- Vergani, A. M., Bagnato, A., & Masseroli, M. (2024). Predicting bovine daily milk yield by leveraging genomic breeding values. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108777. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108777.
- Versluijs, E., Niccolai, L. J., Spedener, M., Zimmermann, B., Hesse, A., Tofastrud, M., Devineau, O., & Evans, A. L. (2023). Classification of behaviors of free-ranging cattle using accelerometry signatures collected by virtual fence collars. *Frontiers in Animal Science*, 4, 1083272. DOI: 10.3389/fanim.2023.1083272.
- Vriezen, R., Plishka, M., & Cranfield, J. (2022). Consumer willingness to pay for traceable food products: A scoping review. *British Food Journal*, 125(5), 1631–1665. DOI: 10.1108/BFJ-01-2022-0085.

- Wood, J. D., Giromini, C., & Givens, D. I. (2024). Animal-derived foods: Consumption, composition and effects on health and the environment: An overview. *Frontiers in Animal Science*, 5, 1332694. DOI: 10.3389/fanim.2024.1332694.
- World Health Organization. (2020, July 29). *Zoonoses*. WHO.
- World Organisation for Animal Health. (2025). *Terrestrial Animal Health Code*.
- World Organisation for Animal Health. (2026, January 19). *Statement on animal welfare during transport*. WOAHA.
- Yan, X., Ying, Y., Li, K., Zhang, Q., & Wang, K. (2024). A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*, 352, 120028. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120028.
- Yin, M., Huang, W., Guo, X., Zhao, Q., Ostojic, G., Loh, T. C., Hu, J., & Zhang, M. (2026). A comprehensive review of wearable sensors for animal information acquisition in precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112175. DOI: 10.1016/j.compag.2026.112175.
- Yin, Y., Ji, N., Wang, X., Shen, W., Dai, B., Kou, S., & Liang, C. (2023). An investigation of fusion strategies for boosting pig cough sound recognition. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107645. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107645.
- Youssef, D. M., Wieland, B., Knight, G. M., Lines, J., & Naylor, N. R. (2021). The effectiveness of biosecurity interventions in reducing the transmission of pathogens in livestock production: A systematic review. *Zoonoses and Public Health*, 68(6), 549–562. DOI: 10.1111/zph.12807.
- Zheng, Y., Xie, T., Li, S., Wang, W., Wang, Y., Cao, Z., & Yang, H. (2022). Effects of selenium as a dietary source on performance, inflammation, cell damage, and reproduction of livestock induced by heat stress: A review. *Frontiers in Immunology*, 12, 820853. DOI: 10.3389/fimmu.2021.820853.

Zuidhof, M. J. (2020). Precision livestock feeding: Matching nutrient supply with nutrient requirements of individual animals. *Journal of Applied Poultry Research*, 29(1), 11–14. DOI: 10.1016/j.japr.2019.12.009.

Resumen

La producción pecuaria contemporánea enfrenta el desafío de responder simultáneamente a las demandas de productividad, seguridad alimentaria, bienestar animal, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica, dentro de contextos territoriales marcados por profundas diferencias sociales, tecnológicas y productivas. Este libro analiza esa transformación desde una mirada integradora, considerando que la eficiencia ya no puede entenderse únicamente como aumento del rendimiento, sino como la capacidad de articular recursos, conocimiento biológico, salud animal, infraestructura, trabajo humano y tecnologías emergentes. A lo largo de sus capítulos se examinan los cambios que atraviesan los sistemas pecuarios, la necesidad de replantear los modelos de producción, la importancia del bienestar y la responsabilidad sanitaria, así como el creciente papel de la digitalización, los sensores, el análisis de datos y la inteligencia artificial. La propuesta sostiene que la tecnología adquiere verdadero valor cuando fortalece la capacidad de decisión de productores, veterinarios y técnicos, sin sustituir el conocimiento contextual ni desconocer las condiciones económicas, ambientales y culturales de cada territorio. Bajo esta perspectiva, los sistemas pecuarios del futuro se conciben como estructuras adaptativas en las que productividad, bienestar, sostenibilidad e innovación deben avanzar de manera articulada.

Palabras Clave: producción pecuaria; bienestar animal; sostenibilidad; tecnologías emergentes; sistemas pecuarios inteligentes.

Abstract

Contemporary livestock production faces the challenge of responding simultaneously to demands for productivity, food security, animal welfare, environmental sustainability, and economic viability within territorial contexts characterized by significant social, technological, and productive differences. This book examines that transformation from an integrated perspective, arguing that efficiency can no longer be understood solely as increased output, but rather as the capacity to connect resources, biological knowledge, animal health, infrastructure, human labor, and emerging technologies. Throughout its chapters, the book explores the changes affecting livestock systems, the need to rethink production models, the importance of animal welfare and health responsibility, and the growing role of digitalization, sensors, data analysis, and artificial intelligence. Technology is presented as most valuable when it strengthens the decision-making capacity of farmers, veterinarians, and technicians without replacing contextual knowledge or overlooking the economic, environmental, and cultural conditions of each territory. From this perspective, future livestock systems are understood as adaptive structures in which productivity, welfare, sustainability, and innovation must develop in an integrated and balanced manner.

Keywords: livestock production; animal welfare; sustainability; emerging technologies; smart livestock systems.

ISBN: 978-9907-9567-4-0



Una obra colectiva que reúne
conocimientos científicos,
experiencias y soluciones
innovadoras para transformar
los sistemas pecuarios hacia
modelos mas productivos,
sostenibles, resilientes y
éticos



OM
EDITORIAL