

Artículo Revisión

Innovaciones en producción animal sostenible

Innovations in sustainable animal production

Diego Alejandro Rayo Vargas^{1*}  

¹Universidad Nacional de Quilmes, Quilmes-Argentina

*Autor de correspondencia: Diego Alejandro Rayo Vargas 

Recibido: 09-08-2024

Revisado: 16-08-2024

Aceptado: 23-08-2024

Publicado: 30-08-2024

Cómo citar este artículo: Rayo Vargas, D. A. (2024). Innovaciones en producción animal sostenible. *Viterra*, 2(2), 1-25.

<https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/12>

RESUMEN

La producción animal desempeña un papel estratégico en la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y los medios de vida de millones de personas; sin embargo, enfrenta crecientes desafíos relacionados con el cambio climático, las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso eficiente de los recursos naturales, el bienestar animal y la necesidad de satisfacer una demanda global de alimentos en constante transformación. El objetivo de este artículo fue analizar sistemáticamente las principales innovaciones orientadas hacia la producción animal sostenible, identificando sus aplicaciones, beneficios, desafíos y tendencias futuras. Se realizó una revisión sistemática de la literatura siguiendo las directrices PRISMA 2020, mediante el análisis de publicaciones científicas y documentos institucionales especializados. La evidencia examinada muestra una creciente incorporación de ganadería de precisión, inteligencia artificial, sensores inteligentes, sistemas digitales de monitoreo, estrategias de alimentación sostenible, manejo regenerativo de pasturas, gestión eficiente del agua y estiércol, mejoramiento de la salud y bienestar animal y modelos productivos orientados hacia la reducción de emisiones. Los resultados evidencian que la sostenibilidad ganadera requiere integrar innovación tecnológica, eficiencia productiva, conservación ambiental y bienestar animal. No obstante, persisten barreras relacionadas con los costos tecnológicos, la conectividad, la capacitación, el acceso desigual a innovaciones y la necesidad de desarrollar políticas adaptadas a diferentes contextos productivos. Se concluye que las innovaciones sostenibles presentan importantes posibilidades para fortalecer la productividad, resiliencia y adaptación climática de los sistemas pecuarios; sin embargo, su consolidación requiere investigación interdisciplinaria, políticas públicas, financiación, cooperación institucional y participación activa de los productores.

Palabras clave: producción animal sostenible; innovación ganadera; ganadería de precisión; sostenibilidad; cambio climático; bienestar animal.

ABSTRACT

Animal production plays a strategic role in food security, economic development, and the livelihoods of millions of people; however, it faces growing challenges related to climate change, greenhouse gas emissions, the efficient use of natural resources, animal welfare, and the need to meet a constantly changing global demand for food. The objective of this article was to systematically analyse the main innovations aimed at sustainable animal production, identifying their applications, benefits, challenges, and future trends. A systematic literature review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines through the analysis of scientific publications and specialised institutional documents. The evidence examined shows a growing incorporation of precision livestock farming, artificial intelligence, smart sensors, digital monitoring systems, sustainable feeding strategies, regenerative pasture management, efficient water and manure management, improved animal health and welfare, and production models aimed at reducing emissions. The results show that livestock sustainability requires the integration of technological innovation, production efficiency, environmental conservation, and animal welfare. However, barriers remain regarding technological costs, connectivity, training, unequal access to innovations, and the need to develop policies adapted to different production

contexts. It is concluded that sustainable innovations offer significant opportunities to strengthen the productivity, resilience, and climate adaptation of livestock systems; however, their consolidation requires interdisciplinary research, public policies, financing, institutional cooperation, and the active participation of producers.

Keywords: sustainable animal production; livestock innovation; precision livestock farming; sustainability; climate change; animal welfare.

1. INTRODUCCIÓN

La producción animal constituye un componente estratégico de los sistemas agroalimentarios debido a su contribución a la seguridad alimentaria, la generación de empleo y el sostenimiento económico de numerosas comunidades rurales. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021) señala que la ganadería proporciona alimentos de elevado valor nutricional y genera materias primas, ingresos y servicios esenciales para millones de familias. Sin embargo, el crecimiento demográfico, las transformaciones en los patrones de consumo y los efectos del cambio climático han incrementado la necesidad de sustituir los modelos convencionales por sistemas productivos más eficientes, resilientes e inclusivos.

La sostenibilidad ganadera representa actualmente uno de los principales desafíos de la transformación agroalimentaria. Los sistemas pecuarios dependen del suelo, el agua, la energía y los recursos destinados a la alimentación animal, al mismo tiempo que generan emisiones de gases de efecto invernadero y residuos orgánicos. El Banco Mundial (2023) advierte que la interacción entre agricultura, producción de alimentos y cambio climático exige intervenciones capaces de conciliar el aumento de la productividad con la conservación de los recursos naturales. En este contexto, resulta indispensable desarrollar estrategias que permitan reducir las presiones ambientales sin comprometer la disponibilidad de alimentos ni los medios de vida rurales.

La FAO (2023a) sostiene que la sostenibilidad de la producción animal no debe evaluarse exclusivamente a partir del rendimiento productivo. Su análisis requiere integrar aspectos ambientales, económicos y sociales, además de considerar la salud y el bienestar de los animales. Desde esta perspectiva, un sistema pecuario sostenible debe producir alimentos de manera eficiente, proteger los ecosistemas, garantizar condiciones adecuadas para los animales y generar beneficios duraderos para las comunidades vinculadas con la actividad.

Esta visión integral también supone reconocer los costos ambientales y sociales que normalmente no aparecen reflejados en el valor comercial de los alimentos. La FAO (2023b) destaca que la transformación de los sistemas agroalimentarios exige identificar estos costos ocultos para orientar inversiones y decisiones públicas más responsables. En la producción animal, este enfoque permite valorar no solamente el volumen obtenido, sino también el uso de los recursos, las emisiones generadas, las condiciones laborales, el bienestar animal y las consecuencias para la salud colectiva.

En los últimos años, la innovación tecnológica ha adquirido una función determinante en estos procesos de transformación. La automatización, la ganadería de precisión, los sensores inteligentes, la inteligencia artificial y las plataformas digitales están modificando progresivamente la gestión de las explotaciones pecuarias. De acuerdo con la FAO (2022), la automatización puede elevar la productividad, mejorar la precisión de las operaciones y reducir ciertas tareas físicamente exigentes. No obstante, sus beneficios dependen de que las tecnologías sean accesibles, pertinentes para el contexto productivo y acompañadas por procesos adecuados de capacitación.

La ganadería de precisión constituye una de las innovaciones con mayor capacidad para transformar el manejo cotidiano de los animales. Mediante sensores, dispositivos portátiles y sistemas de identificación electrónica es posible monitorear la actividad, la temperatura corporal, el consumo de alimentos y determinados cambios de comportamiento. El International Livestock Research Institute (ILRI, 2023) considera que estas herramientas digitales facilitan la recopilación continua de información y permiten adoptar decisiones basadas en datos. Su aplicación puede favorecer la detección temprana de alteraciones sanitarias, reducir pérdidas productivas y mejorar la supervisión del bienestar animal.

La inteligencia artificial amplía estas posibilidades al procesar grandes volúmenes de información e identificar patrones que difícilmente podrían reconocerse mediante observación convencional. Los algoritmos predictivos pueden apoyar la identificación de enfermedades, el seguimiento reproductivo, la estimación del rendimiento y la evaluación de la eficiencia alimentaria. Como explica la FAO (2022), la integración entre automatización y análisis de datos permite desarrollar sistemas más precisos y oportunos. Sin embargo, su implementación requiere infraestructura digital, datos confiables y personal capacitado para interpretar correctamente los resultados.

La innovación sostenible no se limita a la incorporación de tecnologías digitales. También comprende mejoras en la alimentación, el manejo de pasturas, la gestión del agua, el tratamiento del estiércol, la prevención de enfermedades y la conservación de la biodiversidad. La FAO (2021) documenta que las intervenciones climáticamente inteligentes alcanzan mejores resultados cuando combinan conocimientos locales, innovaciones tecnológicas y prácticas adaptadas a las características ambientales de cada territorio. Por ello, la sostenibilidad debe entenderse como un proceso de transformación integral y no como la adopción aislada de equipos o herramientas.

La alimentación animal constituye uno de los ámbitos prioritarios de intervención debido a su influencia sobre los costos de producción, la productividad y las emisiones. El mejoramiento de la calidad de las dietas, la incorporación de recursos locales y la formulación ajustada a los requerimientos nutricionales pueden incrementar la eficiencia con la que los animales convierten el alimento en productos. El ILRI (2022) destaca que determinadas estrategias nutricionales también presentan posibilidades para reducir las emisiones asociadas con la fermentación entérica. De esta manera, la innovación alimentaria puede generar beneficios económicos y ambientales de forma simultánea.

El manejo sostenible de las pasturas representa otra dimensión fundamental. La rotación planificada del pastoreo, la recuperación de áreas degradadas y la integración de árboles y arbustos pueden favorecer la cobertura vegetal, el reciclaje de nutrientes y la protección del suelo. La FAO (2021) reconoce que estas prácticas fortalecen la capacidad de adaptación de los sistemas pecuarios frente a la variabilidad climática. Cuando son aplicadas de acuerdo con las condiciones del territorio, también pueden mejorar la disponibilidad de forraje y reducir la vulnerabilidad de los productores durante períodos de sequía.

La gestión eficiente del agua adquiere especial relevancia en regiones afectadas por escasez y cambios en los patrones de precipitación. Los sistemas ganaderos necesitan agua para el consumo de los animales, la producción de alimentos y la limpieza de las instalaciones. El Banco Mundial (2022) señala que la agricultura climáticamente inteligente debe promover un uso más eficiente de este recurso y fortalecer la capacidad de adaptación ante eventos climáticos extremos. En consecuencia, las tecnologías de medición, almacenamiento, distribución y reutilización del agua representan herramientas importantes para aumentar la resiliencia de las explotaciones pecuarias.

El manejo del estiércol también ofrece oportunidades para avanzar hacia modelos de economía circular. Cuando los residuos ganaderos son gestionados inadecuadamente pueden contaminar el suelo y el agua, producir olores y generar emisiones atmosféricas. No obstante, la FAO (2023a) explica que el tratamiento adecuado del estiércol forma parte de las principales alternativas para reducir las emisiones de los sistemas pecuarios. Tecnologías como el compostaje, la biodigestión y la recuperación de nutrientes permiten transformar estos residuos en fertilizantes orgánicos o energía, disminuyendo su impacto ambiental.

La salud animal constituye igualmente una condición indispensable para la sostenibilidad. Los animales saludables aprovechan mejor los alimentos, alcanzan niveles productivos más estables y requieren menos intervenciones terapéuticas. La FAO (2023a) destaca que el fortalecimiento de la prevención, la bioseguridad y los servicios veterinarios puede reducir las pérdidas productivas y mejorar la eficiencia general de los sistemas. Estas medidas deben complementarse con una utilización responsable de medicamentos para prevenir riesgos como la resistencia a los antimicrobianos.

El bienestar animal ha adquirido una importancia creciente dentro de las políticas públicas, los mercados y las decisiones de los consumidores. Los sistemas productivos deben proporcionar condiciones apropiadas de alimentación, alojamiento, salud y expresión del comportamiento natural. La estrategia europea «De la Granja a la Mesa» reconoce la necesidad de mejorar el bienestar animal como parte de la transición hacia un sistema alimentario

más justo y ambientalmente responsable (European Commission, 2020). Las tecnologías de monitoreo pueden apoyar este propósito al identificar oportunamente señales relacionadas con dolor, enfermedad, estrés o cambios conductuales.

La reducción de emisiones es otro de los grandes desafíos de la producción animal contemporánea. La fermentación entérica, la elaboración de alimentos, el consumo de energía y el manejo del estiércol participan en la generación de gases de efecto invernadero. La evaluación mundial desarrollada por la FAO (2023a) demuestra que existen oportunidades de mitigación mediante el mejoramiento de la productividad, la nutrición, la salud animal y la gestión de residuos. Estas acciones deben adaptarse a cada especie, sistema productivo y contexto territorial para evitar soluciones generales que no respondan a las condiciones locales.

Las posibilidades de innovación son diferentes entre explotaciones intensivas, extensivas, familiares y comunitarias. Una tecnología desarrollada para una unidad altamente tecnificada puede resultar costosa, compleja o poco pertinente para un pequeño productor. El ILRI (2023) sostiene que la construcción de sistemas ganaderos sostenibles requiere soluciones sensibles a las condiciones económicas, sociales y ecológicas de cada territorio. Por consiguiente, la efectividad de una innovación depende tanto de su desempeño técnico como de su accesibilidad, facilidad de uso y capacidad para integrarse en las prácticas existentes.

Esta situación es especialmente relevante en los países de ingresos bajos y medios, donde la ganadería representa una fuente fundamental de alimentos, ahorro e ingresos familiares. En estos contextos, los productores suelen enfrentar limitaciones relacionadas con financiación, infraestructura, conectividad y acceso a servicios veterinarios. El Banco Mundial (2021) reconoce que el desarrollo rural sostenible requiere inversiones que mejoren la productividad y, al mismo tiempo, amplíen las oportunidades de las poblaciones rurales. Las innovaciones pecuarias deben, por tanto, incorporar criterios de inclusión y evitar que la transformación tecnológica profundice las desigualdades existentes.

Las políticas públicas cumplen una función decisiva en la creación de condiciones favorables para esta transición. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2022) indica que las políticas agrícolas deben reformarse para incentivar prácticas compatibles con la mitigación del cambio climático. Asimismo, la FAO (2023d) sostiene que la transformación de los sistemas agroalimentarios requiere orientar las decisiones y las inversiones hacia la generación de valor económico, social y ambiental. Esto implica fortalecer la investigación, la capacitación, el financiamiento, la asistencia técnica y los marcos regulatorios.

Las perspectivas futuras de la producción animal también estarán condicionadas por la evolución de la demanda, los mercados internacionales y las políticas climáticas. Las proyecciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y la FAO (OECD & FAO, 2023) muestran que el sector agropecuario deberá responder simultáneamente al crecimiento de la demanda de alimentos y a mayores exigencias de sostenibilidad. Frente a este escenario, las innovaciones deberán demostrar no solamente su capacidad para aumentar el rendimiento, sino también su contribución a la reducción de impactos ambientales y al fortalecimiento de la resiliencia productiva.

A pesar del creciente número de innovaciones disponibles, la literatura presenta una considerable heterogeneidad en cuanto a tecnologías, especies animales, sistemas de producción, indicadores y metodologías de evaluación. Esta diversidad dificulta establecer cuáles intervenciones cuentan con mayor evidencia, qué beneficios han sido demostrados y qué obstáculos limitan su adopción. La ausencia de una síntesis integrada también complica la formulación de recomendaciones aplicables a distintos contextos productivos.

En consecuencia, resulta pertinente desarrollar una revisión sistemática que organice y sintetice la evidencia reciente sobre las innovaciones aplicadas a la sostenibilidad de los sistemas pecuarios. La pregunta que orienta la investigación es la siguiente: ¿Cuáles son las principales innovaciones identificadas en la literatura reciente para avanzar hacia sistemas de producción animal sostenibles y cuáles son sus aplicaciones, beneficios, desafíos y perspectivas futuras?

El objetivo del presente artículo es analizar sistemáticamente las principales innovaciones aplicadas a la producción animal sostenible, mediante la identificación de las tecnologías y estrategias de manejo disponibles, sus beneficios productivos, ambientales y sociales, los desafíos que condicionan su adopción y las tendencias futuras orientadas a la construcción de sistemas ganaderos más eficientes, resilientes, inclusivos y sostenibles.

2. METODOLOGÍA

Diseño de la investigación

La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura orientada a identificar, seleccionar, analizar y sintetizar la evidencia disponible sobre las innovaciones aplicadas a la producción animal sostenible. Snyder (2019) sostiene que la revisión de la literatura puede constituir un método de investigación cuando se ejecuta mediante procedimientos explícitos, ordenados y reproducibles para localizar, evaluar e integrar el conocimiento existente. La elección de este diseño respondió a la necesidad de organizar una producción científica caracterizada por la diversidad de tecnologías, especies animales, sistemas productivos y contextos geográficos. En consecuencia, la revisión no se limitó a describir las publicaciones identificadas, sino que buscó comparar sus aportes, reconocer tendencias y establecer relaciones entre las innovaciones tecnológicas, las estrategias de manejo y las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Pullin et al. (2022) destacan que las síntesis sistemáticas son particularmente relevantes en los ámbitos ambiental y productivo porque permiten reunir evidencia dispersa, identificar vacíos de conocimiento y proporcionar información útil para la investigación, la gestión y la formulación de políticas.

El procedimiento metodológico se apoyó en las directrices de la Collaboration for Environmental Evidence (2022), debido a que el objeto de estudio integra aspectos relacionados con la sostenibilidad, la mitigación de emisiones, el uso eficiente de los recursos naturales, la resiliencia climática y el bienestar animal. Estas orientaciones establecen que las síntesis de evidencia ambiental deben partir de una pregunta claramente formulada y desarrollar procedimientos verificables para la búsqueda, selección, evaluación y organización de los documentos. De manera complementaria, el reporte de la revisión se estructuró de acuerdo con la declaración PRISMA 2020. Page et al. (2021a) explican que esta guía favorece la presentación transparente de las fuentes consultadas, los criterios de elegibilidad, el flujo de selección y los métodos utilizados para integrar los resultados. Las orientaciones explicativas de Page et al. (2021b) también fueron consideradas para describir las decisiones adoptadas durante la identificación, el cribado, la evaluación del texto completo, la extracción de los datos y la síntesis cualitativa. Por consiguiente, PRISMA se empleó como guía para comunicar el procedimiento, mientras que las decisiones metodológicas se adaptaron a las características de la evidencia sobre producción animal sostenible.

La revisión estuvo orientada por la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las principales innovaciones identificadas en la literatura reciente para avanzar hacia sistemas de producción animal sostenibles y cuáles son sus aplicaciones, beneficios, desafíos y perspectivas futuras? Para delimitar su alcance se consideraron los componentes relacionados con la población, las intervenciones, los resultados y el contexto de aplicación. La población estuvo representada por los sistemas de producción animal, las explotaciones pecuarias y las cadenas ganaderas, mientras que las intervenciones comprendieron tecnologías, prácticas innovadoras y estrategias de manejo sostenible. Los resultados incluyeron la eficiencia productiva, la disminución de los impactos ambientales, la resiliencia climática, la salud y el bienestar animal; por su parte, el contexto incorporó diferentes especies, modalidades productivas y condiciones geográficas. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) señala que la definición de estos componentes permite mantener la correspondencia entre la pregunta, los criterios de elegibilidad, la estrategia de búsqueda y la extracción de la información. Esta delimitación facilitó la inclusión de innovaciones digitales, nutricionales, ambientales, sanitarias e institucionales sin perder la relación directa con la sostenibilidad pecuaria.

El periodo principal de análisis comprendió las publicaciones difundidas entre enero de 2021 y diciembre de 2023, con la finalidad de examinar las tendencias contemporáneas relacionadas con la digitalización, la automatización, la ganadería de precisión, la mitigación de emisiones y la transformación sostenible de los sistemas pecuarios. Rethlefsen et al. (2021) recomiendan declarar expresamente las restricciones temporales y lingüísticas aplicadas a una revisión, debido a que estas decisiones determinan el alcance de la evidencia recuperada y permiten valorar la reproducibilidad de la búsqueda. No obstante, se admitieron excepcionalmente documentos anteriores a 2021 cuando proporcionaban antecedentes conceptuales, políticos o normativos indispensables para interpretar las innovaciones recientes. Esta disposición permitió incluir la estrategia «De la Granja a la Mesa» de la European Commission (2020), cuya

incorporación se justificó por su influencia en las políticas contemporáneas sobre sostenibilidad agroalimentaria, reducción de impactos ambientales y bienestar animal. La delimitación temporal combinó, de este modo, el análisis de la evidencia reciente con la consideración de antecedentes esenciales para comprender su evolución.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda documental se orientó hacia la identificación de publicaciones científicas, informes técnicos, documentos institucionales, guías y estudios especializados relacionados con las innovaciones aplicadas a la producción animal sostenible. Para asegurar una cobertura temática amplia, se consultaron los repositorios y portales oficiales de la Food and Agriculture Organization of the United Nations, el International Livestock Research Institute, el World Bank, la Organisation for Economic Co-operation and Development y la European Commission. La selección de estas organizaciones se justificó por su participación en investigaciones, programas y políticas vinculadas con sostenibilidad ganadera, innovación tecnológica, cambio climático y transformación de los sistemas agroalimentarios. La FAO (2023), por ejemplo, presenta evaluaciones globales sobre las emisiones generadas por los sistemas pecuarios y las alternativas disponibles para su mitigación, mientras que el ILRI (2023) aborda la aplicación de innovaciones digitales en el desarrollo ganadero. La incorporación de fuentes institucionales permitió complementar la evidencia científica con información técnica, proyecciones sectoriales, estudios de casos y recomendaciones de política pública.

La estrategia de búsqueda se construyó a partir de conceptos relacionados directamente con la pregunta y el objetivo de la revisión. Rethlefsen et al. (2021) señalan que una búsqueda sistemática debe describir con precisión las fuentes consultadas, los términos empleados, sus combinaciones y las restricciones aplicadas, debido a que estos elementos determinan la reproducibilidad del procedimiento. A partir de esta orientación, se incorporaron términos relacionados con producción animal sostenible, innovación ganadera, ganadería de precisión, tecnologías digitales, inteligencia artificial, alimentación sostenible, reducción de emisiones, manejo de pasturas, gestión del agua, aprovechamiento del estiércol, salud y bienestar animal y resiliencia climática. La amplitud conceptual respondió al carácter multidimensional del fenómeno estudiado. De acuerdo con la FAO (2021), la transformación sostenible de los sistemas pecuarios requiere combinar innovaciones tecnológicas con prácticas de adaptación climática, eficiencia productiva y manejo responsable de los recursos naturales. Por esta razón, la búsqueda no se restringió exclusivamente a las herramientas digitales, sino que incluyó estrategias nutricionales, ambientales, sanitarias e institucionales.

En español se utilizaron los términos “producción animal sostenible”, “innovación ganadera”, “sistemas ganaderos sostenibles”, “ganadería de precisión”, “tecnologías digitales en producción animal”, “reducción de emisiones ganaderas”, “alimentación animal sostenible”, “manejo sostenible de pasturas”, “bienestar animal”, “resiliencia ganadera” y “adaptación climática de sistemas pecuarios”. Para ampliar la recuperación de evidencia internacional, también se efectuaron búsquedas en inglés mediante las expresiones “sustainable livestock production”, “livestock innovation”, “sustainable livestock systems”, “precision livestock farming”, “digital livestock technologies”, “low-emission livestock”, “sustainable animal feeding”, “regenerative grazing”, “animal welfare”, “livestock resilience” y “climate-smart livestock production”. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) recomienda incorporar sinónimos, variaciones terminológicas y términos alternativos vinculados con los componentes de la pregunta, a fin de disminuir el riesgo de omitir publicaciones pertinentes. La búsqueda bilingüe permitió identificar evidencia procedente de diferentes contextos productivos y evitar que la revisión quedara limitada exclusivamente a los documentos publicados en español.

Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, utilizados respectivamente para relacionar conceptos diferentes y agrupar expresiones equivalentes. La ecuación general de búsqueda fue la siguiente: (“sustainable livestock” OR “sustainable animal production” OR “livestock systems”) AND (“innovation” OR “digital technologies” OR “precision livestock farming” OR “sustainable practices”) AND (“sustainability” OR “climate resilience” OR “emissions reduction” OR “animal welfare”). Esta estructura fue adaptada a las características y opciones de búsqueda disponibles en cada fuente consultada. Page et al. (2021b) indican que las estrategias deben presentarse con suficiente detalle para que puedan ser comprendidas y reproducidas, mientras que Rethlefsen et al.

(2021) recomiendan informar cualquier ajuste realizado en las ecuaciones. Las búsquedas se limitaron principalmente a documentos publicados en español e inglés entre enero de 2021 y diciembre de 2023, aunque se admitieron antecedentes anteriores cuando resultaban indispensables para contextualizar políticas o enfoques todavía vigentes. Los registros recuperados fueron organizados y depurados antes del cribado para identificar duplicaciones y preparar el proceso de selección.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de elegibilidad fueron definidos antes de iniciar la selección de los documentos, con la finalidad de mantener una relación coherente entre la pregunta de investigación, el objetivo de la revisión y la evidencia finalmente analizada. Pullin et al. (2022) señalan que el establecimiento anticipado de estos criterios ayuda a reducir la subjetividad y evita que las decisiones de inclusión o exclusión sean modificadas en función de los resultados encontrados. Para esta investigación se consideraron como criterios principales el periodo de publicación, el idioma, el tipo de documento, la disponibilidad del texto completo, la pertinencia temática y la suficiencia de la información proporcionada. Page et al. (2021b) recomiendan describir con claridad las características que deben cumplir las publicaciones, así como las condiciones específicas que justifican su exclusión. Esta delimitación permitió aplicar parámetros comunes durante la revisión de títulos, resúmenes y textos completos, además de facilitar la trazabilidad de las decisiones adoptadas a lo largo del proceso.

Se incluyeron publicaciones difundidas entre enero de 2021 y diciembre de 2023 que abordaran directamente innovaciones, tecnologías, estrategias de manejo o modelos dirigidos a mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción animal. Los documentos debían analizar al menos una dimensión relacionada con eficiencia productiva, disminución de emisiones, utilización responsable de los recursos naturales, resiliencia climática, salud, bienestar animal o sostenibilidad socioeconómica. La FAO (2023) sostiene que la transformación de los sistemas ganaderos requiere integrar intervenciones productivas, nutricionales, sanitarias y ambientales, por lo que la revisión adoptó una delimitación temática suficientemente amplia para representar esa diversidad. En consecuencia, se consideraron investigaciones sobre ganadería de precisión, sensores inteligentes, inteligencia artificial, automatización, plataformas digitales, alimentación animal, manejo sostenible de pasturas, gestión del agua, tratamiento del estiércol, biodiversidad e integración productiva. También se admitieron estudios sobre políticas públicas, capacitación, financiamiento y adopción tecnológica, debido a que la OECD (2022) reconoce que la implementación de prácticas sostenibles depende tanto de su viabilidad técnica como de los incentivos y marcos institucionales disponibles.

En cuanto al tipo de fuente, fueron incluidos artículos científicos, informes técnicos, documentos institucionales y guías elaboradas por organismos internacionales o centros especializados. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) reconoce que las revisiones relacionadas con problemáticas ambientales pueden integrar distintas formas de evidencia, siempre que su procedencia, pertinencia y contribución a la pregunta de investigación sean evaluadas explícitamente. Los documentos debían encontrarse disponibles en español o inglés, contar con acceso al texto completo y proporcionar información suficiente para identificar las características de la innovación, sus aplicaciones, beneficios, limitaciones o perspectivas futuras. Rethlefsen et al. (2021) recomiendan declarar las restricciones de idioma, fecha y disponibilidad documental, debido a que estas decisiones influyen en el alcance y la reproducibilidad de la búsqueda. Aunque el periodo principal estuvo comprendido entre 2021 y 2024, se admitieron excepcionalmente fuentes anteriores cuando aportaban antecedentes conceptuales o normativos indispensables, como la estrategia «De la Granja a la Mesa» de la European Commission (2020).

Se excluyeron las publicaciones centradas exclusivamente en producción vegetal, acuicultura u otras actividades agrícolas que no establecieran una relación directa con los sistemas pecuarios. También se descartaron los documentos que describían herramientas o tecnologías sin examinar sus implicaciones productivas, ambientales, económicas, sociales o relacionadas con el bienestar animal. Fueron retiradas las publicaciones duplicadas, las fuentes cuyo texto completo no pudo recuperarse y los documentos que carecían de información suficiente para completar la matriz de extracción. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) recomienda aplicar estos criterios de manera

uniforme y registrar las razones de exclusión para fortalecer la transparencia del proceso. No se establecieron restricciones relacionadas con el país o la región de procedencia, debido a que la investigación buscó representar sistemas intensivos, extensivos, familiares y comunitarios desarrollados en diferentes condiciones geográficas. Esta decisión permitió comparar innovaciones implementadas en contextos diversos y reconocer cómo la infraestructura, los recursos económicos, las capacidades técnicas y las condiciones ambientales pueden influir en su adopción.

Proceso de selección de los documentos

El proceso de selección de la evidencia se desarrolló mediante las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión contempladas en la declaración PRISMA 2020. Page et al. (2021a) señalan que la presentación ordenada de estas etapas permite comprender cómo se pasó del conjunto inicial de registros a la selección definitiva de los documentos analizados. Durante la fase de identificación se localizaron 286 registros procedentes de las fuentes consultadas y de las búsquedas complementarias. Rethlefsen et al. (2021) explican que los resultados recuperados deben organizarse de forma sistemática para mantener la trazabilidad entre las estrategias de búsqueda y las publicaciones posteriormente evaluadas. Después de reunir los registros se efectuó la depuración de la información, mediante la cual fueron identificadas y eliminadas 48 duplicaciones. Como resultado de este procedimiento, permanecieron 238 publicaciones para la etapa de cribado. La eliminación de duplicados evitó que un mismo documento fuera examinado o contabilizado más de una vez.

Durante la fase de cribado se revisaron los títulos y resúmenes de los 238 registros restantes mediante la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Pullin et al. (2022) sostienen que el cribado debe conservar una relación directa con los componentes de la pregunta de investigación y ejecutarse mediante criterios consistentes, de modo que las decisiones no dependan de apreciaciones circunstanciales. En esta etapa se examinó si las publicaciones abordaban sistemas de producción animal, describían una innovación o estrategia de manejo y analizaban alguna dimensión vinculada con la sostenibilidad. Como resultado, fueron excluidos 142 documentos porque se concentraban en producción vegetal u otros sistemas no pecuarios, examinaban tecnologías sin establecer una relación con la sostenibilidad o no proporcionaban información pertinente para el objetivo de la revisión. Una vez concluido este proceso, 96 publicaciones fueron seleccionadas para la recuperación y evaluación del texto completo. La etapa de elegibilidad comprendió la lectura integral de los 96 documentos que superaron el cribado inicial. Page et al. (2021b) explican que la evaluación del texto completo permite verificar con mayor precisión el cumplimiento de los criterios, debido a que la información disponible en los títulos y resúmenes puede resultar insuficiente para adoptar una decisión definitiva. Durante esta fase se excluyeron 58 publicaciones por no establecer una relación directa entre las innovaciones estudiadas y la sostenibilidad de los sistemas pecuarios, presentar información insuficiente sobre sus aplicaciones o resultados, reiterar evidencia contenida en otros documentos o no permitir el acceso al texto completo. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) recomienda registrar las razones de exclusión durante esta etapa para que el lector pueda reconocer los motivos por los cuales una publicación aparentemente pertinente no fue incorporada a la síntesis. Este registro también permitió mantener la coherencia en la aplicación de los criterios de elegibilidad.

Finalmente, 38 documentos cumplieron las condiciones establecidas y fueron incorporados a la síntesis cualitativa. El proceso quedó constituido por 286 registros identificados, 48 duplicados eliminados, 238 publicaciones sometidas al cribado de títulos y resúmenes, 96 documentos evaluados mediante lectura completa y 38 fuentes incluidas en la revisión. Pullin et al. (2022) destacan que la transparencia en la selección constituye un elemento fundamental para valorar la confiabilidad de una síntesis de evidencia ambiental. Por esta razón, las cifras y decisiones correspondientes a cada etapa se representaron mediante un diagrama de flujo elaborado conforme al modelo propuesto por Page et al. (2021a). Esta representación permitió visualizar de manera resumida el número de registros identificados, los documentos excluidos en cada fase, las razones principales de exclusión durante la evaluación completa y el conjunto final de publicaciones utilizadas para elaborar los resultados.

Extracción y organización de la información

La información de los 38 documentos incluidos se recopiló mediante una matriz de extracción diseñada en función de la pregunta y los objetivos de la revisión. Page et al. (2021b) señalan que la extracción sistemática requiere definir previamente las variables que serán recopiladas, con el propósito de garantizar uniformidad, transparencia y correspondencia entre los documentos analizados. La matriz permitió registrar los datos mediante criterios comunes y disminuyó el riesgo de omitir información relevante durante el análisis. Para cada publicación se identificaron el autor o la institución responsable, el año de publicación, el ámbito geográfico, el tipo de sistema ganadero y la especie animal estudiada. También se registraron la innovación analizada, la tecnología o estrategia de manejo implementada, el objetivo de la intervención y las características del contexto productivo. Esta estructura facilitó la comparación de documentos científicos, informes técnicos y publicaciones institucionales con enfoques y características metodológicas diferentes.

La extracción también comprendió los principales resultados productivos, ambientales, económicos y sociales comunicados en cada documento. Se registraron los cambios relacionados con productividad, eficiencia alimentaria, utilización de agua y energía, disminución de emisiones, manejo de residuos, salud y bienestar animal y capacidad de adaptación climática. Pullin et al. (2022) explican que los datos extraídos deben mantener una relación directa con los componentes de la pregunta de investigación y proporcionar una base verificable para la síntesis posterior. Por esta razón, también se recopilaron las barreras para la adopción de las innovaciones, entre ellas los costos de implementación, las limitaciones de infraestructura, la falta de conectividad, las necesidades de capacitación y las dificultades de acceso a financiamiento o asistencia técnica. Finalmente, se identificaron las perspectivas futuras y las recomendaciones formuladas por los autores o las instituciones responsables de cada publicación.

Una vez completada la matriz, la información fue revisada y agrupada de acuerdo con la semejanza conceptual y la recurrencia de los hallazgos. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) recomienda organizar los datos mediante criterios explícitos que permitan reconocer cómo los estudios contribuyen a responder la pregunta de investigación. El proceso de agrupación consideró la naturaleza de las innovaciones, sus ámbitos de aplicación y las dimensiones de la sostenibilidad sobre las cuales producían efectos. La información no se clasificó únicamente por el tipo de tecnología, sino también por sus implicaciones productivas, ambientales, sanitarias y sociales. De esta manera, una misma publicación pudo aportar información a más de una categoría cuando examinaba innovaciones integradas o comunicaba resultados pertenecientes a distintas dimensiones. La organización permitió conservar el carácter sistémico de la producción animal sostenible y evitar que las intervenciones fueran interpretadas como soluciones independientes de su contexto.

Las categorías temáticas establecidas comprendieron ganadería de precisión y tecnologías digitales; inteligencia artificial y análisis de datos; innovación en alimentación animal; reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; manejo sostenible y regenerativo de pasturas; gestión eficiente del agua; manejo y valorización del estiércol; salud y bienestar animal; biodiversidad e integración ganadera; intensificación sostenible; resiliencia climática; e innovación institucional y políticas públicas. Page et al. (2021a) destacan que los métodos utilizados para agrupar la evidencia deben describirse claramente, debido a que estas decisiones influyen en la presentación y la interpretación de los resultados. La clasificación temática facilitó la comparación de las estrategias identificadas, la determinación de las áreas con mayor desarrollo y el reconocimiento de las innovaciones con aplicaciones transversales. Asimismo, permitió identificar barreras recurrentes, diferencias entre sistemas productivos y vacíos de conocimiento que requieren nuevas investigaciones.

Evaluación y síntesis de la evidencia

La evaluación inicial de la evidencia mostró una considerable heterogeneidad entre los documentos incluidos, debido a las diferencias existentes en las especies animales, los sistemas productivos, las tecnologías analizadas, los diseños metodológicos y los indicadores utilizados para comunicar los resultados. Algunos documentos examinaron cambios en la productividad o la eficiencia alimentaria, mientras que otros se concentraron en emisiones de gases de efecto

invernadero, bienestar animal, aprovechamiento del agua, gestión de residuos o resiliencia climática. Esta diversidad impidió establecer medidas de efecto suficientemente homogéneas para realizar un metaanálisis cuantitativo. Campbell et al. (2020) explican que, cuando los resultados de los estudios no pueden combinarse estadísticamente, es posible aplicar métodos alternativos de síntesis, siempre que se expongan claramente los criterios de agrupación, comparación e interpretación. En atención a estas condiciones, se optó por una síntesis cualitativa de carácter narrativo y temático, apropiada para integrar hallazgos procedentes de estudios científicos, informes técnicos y documentos institucionales con características diferentes.

La síntesis se desarrolló tomando como referencia las orientaciones SWiM propuestas por Campbell et al. (2020), las cuales favorecen la presentación transparente de revisiones en las que no resulta posible efectuar un metaanálisis. En una primera etapa se analizaron las características generales de la evidencia, entre ellas el año de publicación, la procedencia geográfica, el sistema ganadero estudiado, la especie animal y el tipo de innovación. Posteriormente, los documentos fueron agrupados de acuerdo con las categorías temáticas establecidas durante la extracción de la información. La Collaboration for Environmental Evidence (2022) recomienda que la agrupación responda a criterios definidos previamente y mantenga una relación directa con la pregunta de investigación, debido a que la manera de organizar los documentos condiciona la interpretación final. Por esta razón, las publicaciones se compararon según la naturaleza de la innovación, su ámbito de aplicación y las dimensiones productivas, ambientales, sanitarias, económicas o sociales sobre las cuales comunicaban efectos.

Dentro de cada categoría se examinaron las características de las innovaciones, sus formas de aplicación, los beneficios identificados, las limitaciones y las condiciones que influían en su implementación. Pullin et al. (2022) sostienen que una síntesis confiable debe mantener una relación verificable entre la evidencia extraída y las conclusiones formuladas, además de reconocer las diferencias metodológicas y contextuales de los estudios. En consecuencia, el análisis no se limitó a destacar resultados favorables, sino que también consideró los costos, las necesidades de infraestructura, la disponibilidad de conocimientos técnicos, las dificultades de acceso a financiamiento y las desigualdades entre grandes explotaciones y pequeños productores. También se examinaron las diferencias vinculadas con el territorio, las especies animales y los sistemas intensivos, extensivos, familiares o comunitarios. Este procedimiento permitió evitar generalizaciones que no estuvieran respaldadas por la evidencia e identificar las circunstancias en las que una innovación podía resultar viable o presentar limitaciones.

Finalmente, se efectuó un análisis transversal para reconocer las relaciones existentes entre innovación tecnológica, eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental, resiliencia climática, salud y bienestar animal. Page et al. (2021b) recomiendan describir con precisión la forma en que se integran los resultados y se construyen las interpretaciones de una revisión sistemática, especialmente cuando la síntesis depende de comparaciones cualitativas. A partir de esta orientación, los hallazgos fueron contrastados para identificar coincidencias, diferencias y vacíos de conocimiento entre las categorías temáticas. Campbell et al. (2020) destacan que la síntesis narrativa debe conservar la trazabilidad entre los resultados individuales y las conclusiones generales; por ello, las interpretaciones se formularon únicamente cuando existía respaldo suficiente dentro del conjunto documental. Este procedimiento permitió construir una visión integral sobre las tendencias que orientan la transformación sostenible de los sistemas pecuarios, así como reconocer las innovaciones con mayores beneficios comunicados, las barreras que condicionan su adopción y las áreas que requieren mayor investigación.

3. RESULTADOS

Características generales y evolución de las innovaciones en producción animal sostenible

El análisis de los 38 documentos incluidos evidenció una diversificación progresiva de las innovaciones orientadas a transformar los sistemas de producción animal. Durante los primeros años del periodo examinado predominaron las estrategias relacionadas con eficiencia productiva, adaptación climática y utilización responsable de los recursos. La FAO (2021) identificó la necesidad de avanzar hacia sistemas ganaderos capaces de responder simultáneamente a la demanda alimentaria, la variabilidad climática y las desigualdades rurales. Posteriormente, la automatización y las

tecnologías digitales adquirieron mayor relevancia como instrumentos para mejorar la precisión de las operaciones y la gestión de las explotaciones (FAO, 2022). En los documentos publicados durante 2023 se observó una ampliación hacia enfoques que integraron mitigación de emisiones, bienestar animal, digitalización, economía circular, resiliencia e inclusión productiva. El ILRI (2023) destacó que estas transformaciones deben adaptarse a las condiciones de los territorios y a las capacidades de los productores. En conjunto, los resultados mostraron que la sostenibilidad ganadera dejó de entenderse únicamente como incremento del rendimiento y comenzó a abordarse como la articulación de componentes productivos, ambientales, tecnológicos y sociales.

Los hallazgos permitieron reconocer cuatro tendencias principales. La primera correspondió a la digitalización y automatización de las explotaciones mediante sensores, plataformas de gestión y sistemas inteligentes. La segunda comprendió las innovaciones destinadas a disminuir emisiones, aprovechar residuos y mejorar el uso del suelo, el agua y la energía. La tercera agrupó las estrategias dirigidas a fortalecer la salud, el bienestar y la eficiencia biológica de los animales. La cuarta estuvo vinculada con modelos resilientes, inclusivos y adaptados a las condiciones climáticas y socioeconómicas de cada territorio. La FAO (2023a) mostró que la disminución de las emisiones ganaderas exige combinar alimentación, salud, productividad y manejo de residuos, mientras que la FAO (2023d) destacó la importancia de orientar la transformación agroalimentaria hacia la generación conjunta de valor económico, social y ambiental. La evidencia también reveló que estas innovaciones no operan aisladamente, debido a que una tecnología digital puede mejorar la alimentación y la salud, mientras que un manejo adecuado del estiércol puede disminuir impactos y generar energía.

Ganadería de precisión y tecnologías digitales

La ganadería de precisión se posicionó como una de las innovaciones más recurrentes dentro de los documentos examinados. Este enfoque emplea sensores, dispositivos conectados, cámaras, sistemas de identificación electrónica y plataformas digitales para recopilar información sobre actividad, desplazamiento, temperatura, alimentación, reproducción y productividad. El ILRI (2023) destacó que la disponibilidad continua de datos permite identificar modificaciones que podrían pasar inadvertidas mediante la observación convencional. Los collares inteligentes y otros dispositivos portátiles fueron señalados como herramientas capaces de generar alertas tempranas ante disminuciones del consumo, cambios conductuales o alteraciones reproductivas. La FAO (2022) también identificó la automatización como un recurso con capacidad para incrementar la precisión de las operaciones y reducir determinadas tareas repetitivas. En la evidencia analizada, estas tecnologías aparecieron asociadas con sistemas automáticos de ordeño, alimentación individualizada, control ambiental y seguimiento sanitario. Su aplicación favoreció intervenciones más oportunas, disminuyó ciertos desperdicios y proporcionó información para ajustar las decisiones de manejo a las características de los animales.

No obstante, los beneficios de la ganadería de precisión estuvieron condicionados por la infraestructura, el tamaño de la explotación y las capacidades técnicas disponibles. Los documentos mostraron que las unidades productivas con mayores recursos presentaban mejores posibilidades de adquirir dispositivos, mantener la conectividad y contratar servicios especializados. En contraste, los pequeños productores enfrentaban barreras relacionadas con inversión inicial, mantenimiento, acceso a internet y capacitación. La FAO (2022) advirtió que la automatización puede ampliar las desigualdades cuando su implementación no se acompaña de políticas inclusivas y soluciones ajustadas a las condiciones locales. El Banco Mundial (2021) también reconoció que la transformación rural depende del acceso a infraestructura, financiamiento y servicios técnicos. Por consiguiente, la digitalización no garantizó automáticamente una producción más sostenible o inclusiva. Los resultados indicaron que su contribución dependía de la pertinencia de la tecnología, la calidad de la información generada y la posibilidad de que los productores transformaran esos datos en decisiones concretas.

Inteligencia artificial y análisis de datos en sistemas pecuarios

La inteligencia artificial apareció como una tecnología emergente vinculada con el procesamiento de la información generada por sensores, cámaras, equipos automatizados y plataformas de gestión. Los documentos revisados describieron algoritmos capaces de identificar patrones relacionados con salud, comportamiento reproductivo, crecimiento, producción de leche y eficiencia alimentaria. El ILRI (2023) señaló que la integración de herramientas digitales puede mejorar la oportunidad con la que se detectan problemas y se planifican las intervenciones. En el ámbito sanitario, los sistemas inteligentes analizaron cambios de temperatura, consumo y actividad para generar alertas ante posibles enfermedades. En el ámbito productivo, los modelos predictivos se utilizaron para estimar rendimientos y apoyar la planificación de la alimentación o la reproducción. La visión computacional también fue identificada como una aplicación relevante, debido a que las cámaras y los sistemas de procesamiento de imágenes permiten evaluar comportamiento, condición corporal y desplazamientos sin necesidad de contacto permanente con los animales.

Aunque la inteligencia artificial presentó posibilidades importantes, la revisión identificó limitaciones relacionadas con calidad de los datos, validación, transparencia y capacidad de interpretación. La FAO (2022) indicó que los procesos de automatización requieren información confiable y capacidades humanas que permitan supervisar los resultados. Los algoritmos desarrollados con datos procedentes de explotaciones intensivas o altamente tecnificadas podían disminuir su precisión cuando eran trasladados a especies, regiones o modalidades productivas diferentes. También se identificaron interrogantes sobre propiedad, almacenamiento, privacidad e interoperabilidad de la información. El ILRI (2023) sostuvo que las tecnologías aplicadas a los sistemas ganaderos deben responder a las necesidades reales de los productores y considerar las diferencias territoriales. En consecuencia, los resultados mostraron que la inteligencia artificial no sustituye el conocimiento técnico ni la experiencia de manejo, sino que funciona como una herramienta de apoyo cuya utilidad depende de la calidad de los datos, la validación contextual y la confianza de sus usuarios.

Innovaciones en alimentación animal sostenible

Las innovaciones nutricionales constituyeron una categoría central porque la alimentación influye directamente en los costos, la productividad, la utilización de recursos y la generación de emisiones. La alimentación de precisión fue identificada como una de las estrategias con mayor desarrollo, debido a que permite ajustar el aporte de nutrientes según la especie, edad, condición fisiológica y nivel productivo. La FAO (2023a) señaló que el mejoramiento de las dietas puede incrementar la eficiencia y disminuir la intensidad de emisiones por unidad de producto. Los documentos también describieron el empleo de plataformas digitales para integrar información sobre composición de los alimentos, consumo y características de los animales. Esta capacidad facilitó ajustes más específicos y redujo la administración innecesaria de nutrientes, parte de los cuales podría terminar posteriormente en los residuos. Asimismo, la utilización de subproductos agrícolas y recursos locales apareció como una alternativa para disminuir desperdicios, reducir la dependencia de insumos transportados y fortalecer los ciclos internos de las explotaciones. Las modificaciones de las dietas y el empleo de determinados aditivos fueron examinados por su capacidad potencial para disminuir el metano generado durante la fermentación entérica. El ILRI (2022) identificó la alimentación como un área prioritaria dentro de las respuestas ganaderas frente al cambio climático. Sin embargo, la evidencia mostró que los efectos variaban según la especie, la composición de la dieta, el sistema productivo y las condiciones de manejo. La viabilidad económica también constituyó una limitación, debido a que algunos productos especializados podían resultar inaccesibles para explotaciones pequeñas. La FAO (2021) destacó la importancia de adaptar las prácticas climáticamente inteligentes a las condiciones locales y a la disponibilidad de recursos. Por ello, los resultados indicaron que la alimentación sostenible no depende exclusivamente de formular dietas con mayor precisión, sino de integrar eficiencia nutricional, disponibilidad territorial de insumos, costos, salud animal y reducción de impactos ambientales.

Estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero

La reducción de emisiones fue identificada como uno de los desafíos más complejos de la sostenibilidad ganadera. Las fuentes examinadas atribuyeron las emisiones a la fermentación entérica, el manejo del estiércol, la producción de alimentos, el cambio de uso del suelo y el consumo energético. La evaluación global desarrollada por la FAO (2023a) evidenció que no existe una intervención aislada capaz de resolver esta problemática, por lo que se requiere combinar mejoras nutricionales, sanitarias, reproductivas y ambientales. El aumento de la eficiencia productiva apareció como una estrategia recurrente, debido a que los animales saludables y adecuadamente alimentados pueden generar más producto con una utilización proporcionalmente menor de recursos. Las innovaciones nutricionales, la selección de animales eficientes y la prevención de enfermedades también fueron relacionadas con la disminución de la intensidad de emisiones, aunque sus efectos dependieron de las condiciones del sistema.

El manejo del estiércol y las pasturas complementó las estrategias vinculadas con la eficiencia animal. Los sistemas de almacenamiento, compostaje y digestión anaerobia permitieron disminuir determinadas pérdidas y aprovechar los residuos para producir energía o fertilizantes. La FAO (2023d) destacó la valorización de los recursos como parte de una transformación agroalimentaria orientada a generar beneficios múltiples. El manejo adecuado de las pasturas también mostró posibilidades para conservar el suelo y favorecer el almacenamiento de carbono, aunque los resultados dependieron del clima, la vegetación, el tipo de suelo y la duración de las prácticas. La OECD (2022) señaló que la mitigación requiere políticas capaces de incentivar cambios verificables y evitar el desplazamiento de impactos hacia otras etapas de la producción. En consecuencia, la evidencia respaldó la necesidad de evaluar las emisiones directas e indirectas mediante una perspectiva integral del sistema.

Manejo sostenible y regenerativo de pasturas

El manejo de las pasturas resultó fundamental en los sistemas extensivos y mixtos, debido a su influencia sobre la alimentación, el suelo, la biodiversidad y la disponibilidad de agua. Los documentos mostraron que el sobrepastoreo y la ausencia de periodos de recuperación pueden reducir la cobertura vegetal, incrementar la erosión y deteriorar la capacidad productiva. Frente a estas condiciones, el pastoreo planificado fue identificado como una estrategia para ajustar los periodos de ocupación y descanso a la disponibilidad de forraje y a la capacidad de recuperación de la vegetación. La FAO (2021) documentó que las prácticas climáticamente inteligentes pueden mejorar la productividad y la adaptación cuando se ajustan a las condiciones ecológicas de los territorios. La diversificación de especies forrajeras y la incorporación de leguminosas también mostraron beneficios relacionados con disponibilidad de nutrientes, estabilidad productiva y calidad de la alimentación.

Los sistemas silvopastoriles representaron otra innovación relevante porque combinan árboles, pasturas y animales dentro de una misma unidad productiva. Los árboles pueden proporcionar sombra, reducir la exposición al calor, aportar biomasa y favorecer la conservación del suelo. El ILRI (2023) destacó que los sistemas ganaderos sostenibles deben fortalecer simultáneamente la productividad, la resiliencia y los servicios ecosistémicos. No obstante, los resultados variaron de acuerdo con las condiciones climáticas, la selección de especies, la disponibilidad de agua y las características del suelo. La evidencia mostró que el manejo regenerativo no constituye una práctica uniforme, sino un conjunto de decisiones que debe adaptarse a cada territorio. También se identificó la necesidad de realizar evaluaciones de largo plazo para establecer la permanencia de sus efectos sobre productividad, biodiversidad, calidad del suelo y almacenamiento de carbono.

Gestión eficiente del agua en la producción animal

La disponibilidad de agua fue reconocida como una condición indispensable para el consumo animal, la producción de alimentos y la limpieza de las instalaciones. El Banco Mundial (2022) señaló que la agricultura climáticamente inteligente debe fortalecer la eficiencia hídrica y la capacidad de adaptación frente a sequías y variaciones de las precipitaciones. Entre las innovaciones identificadas se encontraron los medidores de consumo, sistemas automáticos de suministro, mecanismos de detección de fugas y tecnologías de almacenamiento. El monitoreo continuo permitió

reconocer patrones de consumo y detectar incrementos o disminuciones que podían estar asociados con problemas sanitarios o fallas en la infraestructura. También se observaron propuestas para tratar y reutilizar determinadas aguas en actividades compatibles, siempre que se garantizaran condiciones sanitarias apropiadas.

Los resultados también mostraron que la eficiencia hídrica no debe medirse únicamente a partir del agua consumida directamente por los animales. La producción de granos, forrajes y otros insumos alimentarios representa una parte importante del uso indirecto de este recurso. La FAO (2021) destacó que las estrategias de adaptación deben considerar conjuntamente agua, suelo, alimentación y productividad. En las regiones afectadas por escasez, la selección de especies adaptadas, el mejoramiento de la infraestructura y la planificación de reservas fueron identificados como componentes esenciales de la resiliencia. La evidencia indicó, por tanto, que la gestión sostenible del agua necesita abarcar toda la cadena productiva y considerar tanto la cantidad utilizada como su calidad, disponibilidad territorial y vulnerabilidad climática.

Manejo, tratamiento y valorización del estiércol

El estiércol presentó una doble condición dentro de los sistemas pecuarios: puede convertirse en una fuente de contaminación cuando se gestiona inadecuadamente, pero también constituye un recurso con capacidad para proporcionar nutrientes y energía. La FAO (2023a) identificó el manejo de residuos como una de las áreas prioritarias para mitigar las emisiones de la ganadería. Entre las innovaciones examinadas se encontraron el compostaje, la digestión anaerobia y la recuperación de nutrientes. El compostaje permitió transformar la materia orgánica en productos aprovechables para mejorar los suelos, mientras que los biodigestores hicieron posible obtener biogás y materiales con potencial fertilizante. La recuperación de nitrógeno y fósforo contribuyó a disminuir pérdidas y a reducir parcialmente la dependencia de insumos externos.

La valorización del estiércol fue relacionada con el desarrollo de modelos de economía circular, en los cuales los residuos de una actividad se reincorporan como recursos dentro del propio sistema o de otras cadenas productivas. La FAO (2023d) destacó que esta transformación puede generar valor económico y ambiental cuando se acompaña de tecnologías apropiadas y mecanismos seguros de utilización. Sin embargo, los costos de instalación, mantenimiento y operación limitaron la adopción de determinadas alternativas. Las grandes explotaciones presentaron mayores posibilidades de invertir en sistemas complejos, mientras que los pequeños productores necesitaron tecnologías de menor escala o modelos asociativos. Los documentos señalaron que las cooperativas y las instalaciones compartidas pueden facilitar la distribución de costos, aunque requieren coordinación, asistencia técnica y marcos regulatorios adecuados.

Innovaciones para la salud y el bienestar animal

La salud animal apareció estrechamente relacionada con la productividad, la eficiencia en el uso de los alimentos y la estabilidad económica de las explotaciones. La FAO (2023a) indicó que la prevención de enfermedades puede disminuir pérdidas y reducir la intensidad de emisiones al mejorar el rendimiento de los animales. Entre las innovaciones identificadas destacaron la vigilancia digital, los sensores de actividad, los dispositivos de medición de temperatura y los sistemas de alerta temprana. Estas herramientas permitieron reconocer alteraciones conductuales o fisiológicas y facilitaron intervenciones antes de que los problemas alcanzaran mayor gravedad. El ILRI (2023) también destacó la contribución de las plataformas digitales a la vigilancia sanitaria y al acceso oportuno a información. El bienestar animal se incorporó progresivamente como una dimensión propia de la sostenibilidad. La European Commission (2020) relacionó la transformación de los sistemas alimentarios con el fortalecimiento de las condiciones de salud y bienestar de los animales. Los documentos revisados examinaron indicadores relacionados con alimentación, alojamiento, estrés térmico, movilidad y expresión del comportamiento. Aunque las tecnologías facilitaron el monitoreo, los hallazgos mostraron que el bienestar no puede depender exclusivamente de sensores o algoritmos. El diseño de las instalaciones, la capacitación del personal y las prácticas cotidianas de manejo continuaron

desempeñando una función determinante. La prevención también fue asociada con una menor necesidad de tratamientos y con el uso responsable de antimicrobianos.

Biodiversidad, salud del suelo e integración ganadera

La revisión mostró que la relación entre producción animal y biodiversidad depende del diseño y manejo de los sistemas. Las prácticas inadecuadas pueden contribuir a la degradación de los ecosistemas, mientras que determinados modelos integrados pueden conservar paisajes, reciclar nutrientes y diversificar la producción. La FAO (2021) documentó que los sistemas climáticamente inteligentes alcanzan mejores resultados cuando fortalecen las relaciones entre suelo, vegetación, animales y recursos hídricos. Los sistemas mixtos permitieron utilizar residuos de cultivos como alimento y reincorporar el estiércol como fertilizante, reduciendo parcialmente la dependencia de insumos externos. Los modelos silvopastoriles también favorecieron la diversificación estructural mediante la integración de árboles, pasturas y animales.

La salud del suelo apareció como un componente esencial porque condiciona la producción de forraje, la infiltración de agua y el reciclaje de nutrientes. El ILRI (2023) reconoció la necesidad de desarrollar sistemas pecuarios capaces de conservar los recursos naturales y responder a las condiciones territoriales. Los documentos identificaron la cobertura vegetal, la materia orgánica y la diversidad de especies como elementos asociados con una mayor estabilidad ecológica. No obstante, los beneficios variaron según el clima, la intensidad del pastoreo y las características del ecosistema. Los resultados confirmaron que la biodiversidad, el suelo y la producción animal deben analizarse de forma integrada, debido a que las intervenciones sobre uno de estos componentes pueden generar efectos sobre los demás.

Intensificación sostenible de los sistemas ganaderos

La intensificación sostenible fue descrita como la búsqueda de mayores niveles de eficiencia productiva sin incrementar proporcionalmente la presión sobre los recursos y el ambiente. La OECD y la FAO (2023) proyectaron que los sistemas agropecuarios deberán responder al crecimiento de la demanda alimentaria en un escenario marcado por exigencias climáticas y ambientales. Las innovaciones digitales, la alimentación de precisión, el mejoramiento sanitario y la gestión eficiente de los residuos aparecieron como instrumentos capaces de apoyar este proceso. Sin embargo, los documentos advirtieron que la intensificación no debe interpretarse únicamente como el aumento del número de animales o del volumen producido, debido a que estas acciones pueden elevar el consumo de recursos y la generación total de residuos.

La evidencia mostró que la intensificación sostenible necesita considerar la capacidad de los ecosistemas, el bienestar animal y las condiciones sociales de los productores. El ILRI (2023) destacó la importancia de desarrollar modelos adaptados a los países de ingresos bajos y medios, donde la ganadería cumple funciones alimentarias, económicas y culturales. Las innovaciones inaccesibles para las explotaciones familiares podrían profundizar las desigualdades y concentrar sus beneficios en unidades con mayores recursos. Por tanto, los resultados indicaron que la intensificación solo puede considerarse sostenible cuando integra eficiencia, reducción de impactos, viabilidad económica e inclusión social.

Resiliencia y adaptación climática de los sistemas pecuarios

El cambio climático fue identificado como una amenaza transversal debido a sus efectos sobre temperatura, precipitaciones, disponibilidad de agua, producción de forraje y presencia de enfermedades. El Banco Mundial (2022) señaló que la agricultura climáticamente inteligente debe combinar productividad, adaptación y reducción de emisiones. Entre las estrategias encontradas destacaron la diversificación productiva, el manejo sostenible de las pasturas, la conservación de reservas alimentarias y la selección de animales adaptados. Las razas locales aparecieron como recursos relevantes en determinados territorios por su tolerancia a condiciones climáticas y sanitarias específicas, aunque su aprovechamiento requiere programas de conservación y mejoramiento apropiados.

Las tecnologías digitales también aportaron información climática y alertas para anticipar periodos de escasez, temperaturas extremas o alteraciones sanitarias. La FAO (2021) evidenció que la adaptación alcanza mejores

resultados cuando integra innovación tecnológica, conocimientos locales y fortalecimiento de las capacidades productivas. La infraestructura destinada a proporcionar sombra, ventilación y acceso seguro al agua fue particularmente relevante frente al estrés térmico. No obstante, la resiliencia no dependió únicamente de prácticas técnicas, sino también del financiamiento, los seguros, la asistencia veterinaria y el acceso a información. Los resultados mostraron que la adaptación climática requiere combinar recursos biológicos, infraestructura, planificación y apoyo institucional.

Políticas públicas e innovación institucional

Las políticas públicas fueron identificadas como un componente determinante para ampliar la adopción de innovaciones sostenibles. La OECD (2022) destacó la necesidad de reformar los instrumentos de apoyo agropecuario para promover prácticas compatibles con la mitigación climática. Los documentos revisados señalaron que los productores requieren financiamiento, infraestructura, conectividad, capacitación y servicios de extensión para incorporar nuevas tecnologías. La inversión en investigación también resultó esencial para desarrollar soluciones adaptadas a las especies, ecosistemas y capacidades económicas de cada territorio. En este proceso, la cooperación entre universidades, centros especializados, empresas y organizaciones de productores favoreció la generación y transferencia de conocimientos.

La European Commission (2020) mostró que la transformación sostenible también requiere regulaciones relacionadas con ambiente, salud, trazabilidad y bienestar animal. Sin embargo, los resultados evidenciaron que las exigencias uniformes pueden generar cargas desproporcionadas para las pequeñas explotaciones. La FAO (2023d) destacó que las políticas deben orientar la transformación hacia la creación de valor económico, social y ambiental. En consecuencia, la innovación institucional no se limitó al establecimiento de normas, sino que comprendió incentivos, asistencia técnica, investigación participativa y mecanismos de cooperación. La transformación de los sistemas pecuarios dependió, por tanto, de la existencia de entornos institucionales capaces de reducir riesgos y facilitar el acceso equitativo a las innovaciones.

Principales barreras para adoptar innovaciones sostenibles

Los costos de adquisición, instalación y mantenimiento constituyeron una de las barreras más frecuentes. La FAO (2022) advirtió que la automatización puede excluir a productores con menor capacidad económica cuando no existen mecanismos de acceso adecuados. Las limitaciones de conectividad también restringieron el funcionamiento de sensores, plataformas y sistemas basados en datos en numerosas zonas rurales. A estas dificultades se sumaron la escasez de capacitación, la falta de asistencia técnica y la incertidumbre sobre la rentabilidad de las innovaciones. Los productores mostraron mayor disposición a adoptar soluciones cuando podían observar beneficios concretos y compatibles con sus necesidades productivas.

La fragmentación tecnológica, los problemas de interoperabilidad y las dudas sobre propiedad y privacidad de los datos aparecieron como obstáculos adicionales. El ILRI (2023) destacó la necesidad de desarrollar innovaciones digitales pertinentes y accesibles para los diferentes sistemas ganaderos. El Banco Mundial (2021) también relacionó la transformación rural con la disponibilidad de infraestructura, financiamiento y servicios. Los resultados mostraron que las diferencias climáticas, económicas y culturales impiden transferir una misma solución de manera uniforme entre territorios. En consecuencia, la superación de las barreras requiere combinar tecnología, capacitación, financiamiento, acompañamiento institucional y adaptación local.

Tendencias futuras de la innovación en producción animal sostenible

Las tendencias identificadas mostraron una evolución hacia sistemas más conectados, predictivos e integrados. La combinación de sensores, inteligencia artificial y automatización permitirá generar alertas y recomendaciones relacionadas con alimentación, reproducción, salud y bienestar. La FAO (2022) anticipó que la automatización continuará transformando los sistemas agroalimentarios, aunque su desarrollo deberá acompañarse de medidas que reduzcan las desigualdades de acceso. La alimentación de precisión y las estrategias de mitigación también adquirirán

mayor importancia ante el aumento de las exigencias climáticas. La FAO (2023a) destacó que las futuras reducciones de emisiones dependerán de la integración de diferentes intervenciones y no de una tecnología aislada.

La economía circular, la recuperación de nutrientes, la producción de energía a partir de residuos y los sistemas regenerativos constituyeron otras tendencias relevantes. El bienestar animal y la trazabilidad digital también incrementarán su presencia como respuesta a las políticas y demandas sociales. La FAO (2023d) señaló que la transformación futura deberá generar valor económico, ambiental y social, mientras que el ILRI (2023) destacó la importancia de mantener la inclusión de los pequeños productores. Los modelos cooperativos, las plataformas compartidas y los servicios tecnológicos podrían facilitar el acceso a herramientas que individualmente resultarían costosas. En conjunto, la evidencia mostró que el futuro de la producción animal sostenible dependerá de la articulación entre innovación tecnológica, manejo ecológico, bienestar animal, políticas públicas y desarrollo territorial.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la revisión evidencian que las innovaciones aplicadas a la producción animal están impulsando una transformación progresiva de los sistemas pecuarios. La sostenibilidad ganadera ya no puede comprenderse exclusivamente como el incremento de la productividad, debido a que también involucra la eficiencia en el uso de los recursos, la disminución de los impactos ambientales, la adaptación climática, la salud, el bienestar animal y la inclusión social. La FAO (2021) sostiene que la transformación del sector debe responder simultáneamente a los desafíos alimentarios, ambientales y socioeconómicos de los territorios rurales. Esta perspectiva coincide con la estrategia del ILRI (2021), en la que la investigación pecuaria se presenta como un instrumento para mejorar los medios de vida y proteger los recursos del planeta. La FAO (2023d) amplía este enfoque al proponer una transformación agroalimentaria basada en la generación conjunta de valor económico, social y ambiental. En consecuencia, los hallazgos confirman que la sostenibilidad constituye una propiedad sistémica y no el resultado de una intervención productiva aislada.

Uno de los principales hallazgos corresponde al crecimiento de la ganadería de precisión y las tecnologías digitales. La incorporación de sensores, dispositivos conectados, cámaras, plataformas de gestión y sistemas automatizados modifica los procedimientos convencionales de monitoreo y facilita la recopilación continua de información sobre actividad, alimentación, reproducción, salud y condiciones ambientales. El ILRI (2023) destaca que las innovaciones digitales pueden fortalecer la toma de decisiones y ampliar el acceso a información relevante dentro de los sistemas ganaderos. Estas herramientas adquieren una importancia particular en explotaciones con grandes cantidades de animales, donde el seguimiento individual mediante observación directa presenta mayores dificultades. La FAO (2022) reconoce que la automatización puede incrementar la precisión de las operaciones, optimizar determinados procesos y disminuir algunas tareas repetitivas. No obstante, estas ventajas no eliminan la importancia del conocimiento de los productores, sino que amplían sus capacidades para identificar alteraciones, priorizar intervenciones y evaluar el comportamiento de la explotación.

La expansión de la ganadería de precisión también expone desigualdades relacionadas con infraestructura, financiamiento, conectividad y capacitación. Las explotaciones con mayores recursos disponen de mejores condiciones para adquirir equipos, contratar servicios especializados y mantener plataformas digitales, mientras que los pequeños productores enfrentan obstáculos que limitan su incorporación. La FAO (2022) advierte que la automatización puede profundizar las desigualdades cuando las políticas de innovación no consideran las capacidades de los grupos rurales más vulnerables. Este resultado coincide con la perspectiva del Banco Mundial (2021), que vincula el desarrollo rural con el acceso a infraestructura, financiamiento y asistencia técnica. Por ello, la disponibilidad de una tecnología no garantiza su adopción ni asegura que sus beneficios se distribuyan equitativamente. Los modelos cooperativos, los servicios tecnológicos compartidos y los programas de financiamiento podrían disminuir ciertas barreras, pero también requieren coordinación institucional y acompañamiento continuo. La digitalización debe evaluarse, por tanto, no solamente por su desempeño técnico, sino también por su accesibilidad y pertinencia territorial.

La inteligencia artificial representa una extensión de estos procesos al transformar los datos en predicciones, alertas y recomendaciones. La integración de algoritmos con sensores y cámaras permite identificar patrones relacionados con

enfermedades, comportamiento reproductivo, consumo de alimento y rendimiento productivo. El ILRI (2023) reconoce que el análisis digital puede favorecer decisiones más oportunas y mejorar la capacidad de seguimiento de los sistemas pecuarios. Sin embargo, los resultados de la revisión muestran que el funcionamiento de estas herramientas depende directamente de la cantidad, calidad y representatividad de los datos utilizados. Los modelos desarrollados con información procedente de explotaciones intensivas podrían presentar un rendimiento diferente cuando se aplican en sistemas extensivos, especies distintas o territorios con otras condiciones ambientales. La estrategia del ILRI (2023) insiste en la necesidad de desarrollar soluciones ajustadas a los contextos productivos y sociales. En consecuencia, los sistemas inteligentes deben someterse a validaciones locales antes de incorporarse a decisiones con consecuencias sanitarias o económicas.

La transparencia y la gobernanza de los datos constituyen desafíos adicionales para la inteligencia artificial. Los productores necesitan comprender de manera suficiente las alertas o recomendaciones generadas para determinar si son coherentes con la situación observada en la explotación. La FAO (2022) señala que la automatización sostenible requiere combinar tecnología, capacidades humanas y condiciones institucionales adecuadas. Este planteamiento confirma que los algoritmos no deben sustituir la responsabilidad profesional ni el conocimiento práctico, especialmente cuando sus resultados pueden afectar la salud o el bienestar de los animales. La propiedad, almacenamiento y utilización de los datos también requieren reglas transparentes, debido a que las plataformas acumulan información productiva y económica potencialmente sensible. La ausencia de estándares comunes puede generar dependencia de determinados proveedores y dificultades para intercambiar información entre dispositivos. Por ello, la confianza de los productores dependerá no solamente de la precisión técnica, sino también de la existencia de mecanismos claros de privacidad, interoperabilidad, seguridad y control de los datos.

Los hallazgos relacionados con alimentación sostenible confirman que la nutrición constituye uno de los principales puntos de conexión entre productividad y sostenibilidad ambiental. La FAO (2023a) identifica el mejoramiento de las dietas como una alternativa para elevar la eficiencia y reducir la intensidad de las emisiones ganaderas. La alimentación de precisión permite ajustar los nutrientes a la edad, especie, condición fisiológica y nivel productivo de los animales, lo que puede disminuir desperdicios y reducir la eliminación de determinados compuestos mediante los residuos. El ILRI (2022) también reconoce que las estrategias nutricionales forman parte de las respuestas disponibles frente al cambio climático. No obstante, su efectividad y viabilidad pueden variar según el sistema productivo, la composición de los alimentos y la disponibilidad de insumos. Los aditivos o productos especializados con costos elevados pueden resultar poco accesibles para las pequeñas explotaciones. En estos casos, la utilización segura de subproductos y recursos locales podría favorecer la economía circular, disminuir la dependencia de alimentos externos y generar soluciones más ajustadas a las condiciones territoriales.

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero exige una perspectiva integral, debido a que los impactos proceden de la fermentación entérica, el estiércol, la producción de alimentos, el consumo de energía y el cambio de uso del suelo. La evaluación global de la FAO (2023a) confirma que no existe una única intervención capaz de resolver esta problemática y que las estrategias deben integrar nutrición, salud, productividad, reproducción y manejo de residuos. El mejoramiento de la eficiencia puede disminuir las emisiones por unidad de producto; sin embargo, un incremento elevado del volumen total podría mantener o aumentar las emisiones absolutas. La OECD (2022) destaca que las políticas de mitigación deben considerar estos efectos para evitar que los avances en una dimensión sean neutralizados por el crecimiento de otras presiones. Por consiguiente, las evaluaciones futuras deberían diferenciar entre intensidad y volumen total de emisiones e incorporar aproximaciones de ciclo de vida que permitan examinar los impactos directos e indirectos a lo largo de la cadena productiva.

El tratamiento y la valorización del estiércol representan oportunidades concretas para integrar mitigación, aprovechamiento de recursos y economía circular. La FAO (2023a) reconoce que el manejo adecuado de los residuos puede reducir determinadas emisiones, mientras que el compostaje y la digestión anaerobia permiten producir fertilizantes orgánicos o energía. La FAO (2023d) sostiene que la transformación sostenible debe convertir los recursos subutilizados en fuentes de valor económico y ambiental. No obstante, los beneficios dependen del diseño de las

tecnologías, el volumen de residuos disponible y las capacidades de operación y mantenimiento. Los costos pueden limitar la instalación de biodigestores o sistemas avanzados de recuperación de nutrientes en pequeñas unidades productivas. Los modelos cooperativos podrían distribuir los gastos y facilitar el acceso, aunque su funcionamiento requiere acuerdos sobre recolección, transporte, distribución de beneficios y responsabilidades sanitarias. Por ello, la valorización del estiércol debe adaptarse a la escala productiva y acompañarse de capacitación y evaluaciones de viabilidad.

El manejo sostenible de las pasturas y los sistemas silvopastoriles evidencian la necesidad de articular la producción animal con los procesos ecológicos. La FAO (2021) muestra que la recuperación de áreas degradadas, la planificación del pastoreo y la diversificación de la vegetación pueden fortalecer la adaptación climática y la disponibilidad de alimento. Los árboles incorporados en sistemas silvopastoriles proporcionan sombra, biomasa y protección del suelo, beneficios particularmente relevantes frente al incremento de las temperaturas. El ILRI (2023) destaca que la sostenibilidad ganadera requiere conservar los recursos naturales y desarrollar alternativas sensibles a las condiciones ecológicas de cada territorio. Sin embargo, las prácticas regenerativas no producen resultados idénticos en todos los contextos. Sus efectos dependen del clima, la intensidad del pastoreo, las especies vegetales, el tipo de suelo y el tiempo transcurrido desde la implementación. Por esta razón, se necesitan estudios longitudinales que evalúen simultáneamente productividad, biodiversidad, salud del suelo, bienestar animal y emisiones.

La gestión del agua constituye otra dimensión que debe analizarse desde una perspectiva sistémica. El Banco Mundial (2022) sostiene que la agricultura climáticamente inteligente necesita incrementar la eficiencia hídrica y fortalecer la capacidad de respuesta frente a sequías y eventos extremos. Los sensores y medidores pueden identificar patrones de consumo, detectar fugas y reconocer alteraciones relacionadas con la salud animal. Sin embargo, el consumo directo representa solamente una parte de la huella hídrica, debido a que la producción de forrajes y alimentos también requiere cantidades significativas de agua. La FAO (2021) señala que la adaptación debe integrar recursos hídricos, suelo, alimentación y productividad. En consecuencia, las soluciones no pueden limitarse a instalar sistemas automáticos de suministro, sino que deben considerar almacenamiento, calidad, reutilización segura, eficiencia en la producción de alimento y selección de modelos productivos compatibles con la disponibilidad territorial.

La salud y el bienestar animal se consolidan como componentes inseparables de la sostenibilidad. La FAO (2023a) indica que los animales saludables aprovechan mejor los recursos y presentan menores pérdidas productivas, por lo que la prevención también puede contribuir a reducir la intensidad de emisiones. Los sistemas de vigilancia, los sensores y las alertas tempranas fortalecen la detección de alteraciones, pero no sustituyen los programas sanitarios, la bioseguridad ni los servicios veterinarios. La prevención también puede disminuir la necesidad de tratamientos y favorecer el uso responsable de antimicrobianos. En relación con el bienestar, la European Commission (2020) reconoce la necesidad de mejorar las condiciones de producción como parte de la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles. Las tecnologías pueden ayudar a monitorear actividad, estrés térmico o movilidad, aunque las condiciones de alojamiento, alimentación y manejo continúan dependiendo de decisiones humanas. Esta consideración evita interpretar la digitalización como una solución autónoma frente a problemas originados por instalaciones o prácticas inadecuadas.

Los resultados sobre biodiversidad, salud del suelo e integración productiva confirman que las explotaciones pecuarias mantienen relaciones permanentes con los ecosistemas donde se desarrollan. La FAO (2021) documenta que los sistemas mixtos pueden utilizar residuos agrícolas como alimento y reincorporar el estiércol como fuente de nutrientes, fortaleciendo los ciclos internos. Esta circularidad disminuye parcialmente la dependencia de insumos externos y puede generar una mayor estabilidad productiva. El ILRI (2023) también plantea que la sostenibilidad exige reconocer las interacciones entre animales, vegetación, suelo y medios de vida. No obstante, los sistemas integrados presentan una complejidad mayor y requieren conocimientos para coordinar sus diferentes componentes. La asistencia técnica resulta fundamental para evitar que una intensificación del reciclaje de materiales ocasione problemas sanitarios o acumulaciones de nutrientes. Por tanto, la integración debe acompañarse de planificación, seguimiento y adaptación a las características de cada ecosistema.

La intensificación sostenible plantea uno de los debates más complejos de la transformación pecuaria. Las proyecciones de la OECD y la FAO (2023) muestran que los sistemas agroalimentarios deberán responder a una demanda creciente, al mismo tiempo que enfrentan restricciones ambientales y climáticas. La alimentación de precisión, la prevención sanitaria y la digitalización pueden elevar la eficiencia, pero no garantizan por sí mismas una reducción de los impactos totales. La FAO (2023b) advierte que la evaluación de los sistemas alimentarios debe reconocer costos ambientales y sociales que normalmente no aparecen en los precios de mercado. En consecuencia, la intensificación no puede considerarse sostenible si incrementa la presión sobre el suelo, el agua o el bienestar animal, aunque mejore determinados indicadores productivos. Su evaluación requiere combinar productividad, emisiones, uso de recursos, viabilidad económica y efectos sociales.

La inclusión de los pequeños productores constituye una condición fundamental para que la transformación no profundice las desigualdades rurales. El Banco Mundial (2021) destaca que la agricultura cumple una función decisiva en los ingresos y medios de vida de numerosas poblaciones, especialmente en países de ingresos bajos y medios. La estrategia del ILRI (2023) propone desarrollar sistemas ganaderos sensibles a las necesidades económicas y sociales de estos contextos. La transferencia directa de soluciones diseñadas para explotaciones altamente tecnificadas puede resultar inviable cuando existen limitaciones de conectividad, financiamiento o asistencia técnica. En este escenario, la innovación frugal, los servicios compartidos y las tecnologías de bajo costo presentan posibilidades relevantes. No obstante, su desarrollo debe involucrar a los productores para asegurar que las soluciones respondan a problemas reales y puedan mantenerse una vez finalizados los programas externos.

La resiliencia climática también depende de la interacción entre capacidades técnicas, recursos económicos e instituciones. La FAO (2021) identifica la diversificación, el manejo de pasturas, la selección de animales adaptados y la información climática como componentes importantes de la adaptación. Sin embargo, los productores expuestos a sequías, estrés térmico o escasez de alimento requieren además financiamiento, seguros, servicios veterinarios y mecanismos de protección. El Banco Mundial (2022) reconoce que las tecnologías climáticamente inteligentes deben integrarse con políticas que reduzcan la vulnerabilidad. Este resultado confirma que la innovación tecnológica no puede resolver de manera aislada problemas estructurales relacionados con pobreza, aislamiento territorial o escasa infraestructura. La resiliencia surge de la combinación de prácticas productivas, recursos biológicos, planificación, capacidad económica y apoyo institucional.

Las políticas públicas cumplen, por tanto, una función decisiva en la creación de condiciones para la adopción. La OECD (2022) recomienda reformar los instrumentos de apoyo agrícola para incentivar prácticas compatibles con la mitigación climática. La European Commission (2020) también propone articular investigación, innovación, regulación y bienestar dentro de la transformación agroalimentaria. Los hallazgos muestran que el financiamiento, la extensión rural, la conectividad y la capacitación constituyen componentes indispensables para reducir los riesgos que enfrentan los productores. La cooperación entre universidades, centros de investigación, empresas, gobiernos y organizaciones productivas puede favorecer el desarrollo de soluciones adaptadas a cada territorio. No obstante, las regulaciones deben considerar las diferencias de escala, debido a que los requisitos uniformes pueden imponer cargas desproporcionadas a las pequeñas explotaciones.

En conjunto, la revisión permite sostener que la innovación en producción animal sostenible está evolucionando desde soluciones aisladas hacia sistemas integrados. La digitalización puede fortalecer la alimentación, la salud y la gestión de recursos; el manejo ecológico puede mejorar el suelo y la resiliencia; mientras que la valorización de residuos puede reducir impactos y generar energía. La FAO (2023d) confirma que la transformación agroalimentaria requiere generar valor en múltiples dimensiones y no únicamente aumentar la producción. Sin embargo, persisten vacíos relacionados con evaluaciones longitudinales, comparación entre territorios, interoperabilidad tecnológica y distribución social de los beneficios. Las futuras investigaciones deberán integrar indicadores productivos, ambientales, económicos y sociales, además de incorporar la participación de los productores. Desde esta perspectiva, la innovación no debe reducirse a la adopción de tecnologías avanzadas, sino entenderse como un proceso de transformación productiva,

ecológica e institucional orientado hacia sistemas ganaderos eficientes, resilientes, inclusivos y capaces de responder a los desafíos alimentarios y climáticos contemporáneos. Principio del formulario

Final del formulario

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió analizar las principales innovaciones aplicadas a la producción animal sostenible y establecer sus contribuciones a la transformación de los sistemas pecuarios contemporáneos. Los hallazgos demuestran que la sostenibilidad ganadera constituye un proceso multidimensional que requiere articular eficiencia productiva, innovación tecnológica, conservación de los recursos naturales, reducción de emisiones, adaptación climática, salud y bienestar animal e inclusión social. En consecuencia, la transformación del sector no puede depender de una tecnología o práctica aislada, sino de la combinación de estrategias ajustadas a las características ambientales, económicas y sociales de cada territorio. Esta perspectiva sistémica permite comprender que el aumento de la productividad solamente contribuye a la sostenibilidad cuando se acompaña de una utilización responsable del suelo, el agua, la energía y los alimentos, así como de condiciones apropiadas para los animales y oportunidades equitativas para los diferentes tipos de productores.

En respuesta a la pregunta de investigación, se concluye que las innovaciones con mayor presencia en la literatura reciente comprenden la ganadería de precisión, los sensores inteligentes, la inteligencia artificial, el análisis de datos, la automatización, la alimentación de precisión, las estrategias nutricionales para disminuir emisiones, el manejo regenerativo de pasturas, los sistemas silvopastoriles, la gestión eficiente del agua, la valorización del estiércol, la prevención sanitaria y las tecnologías aplicadas al bienestar animal. También se identificaron innovaciones relacionadas con la integración productiva, la intensificación sostenible, la economía circular y la adaptación climática. Aunque estas alternativas presentan características diferentes, sus mayores beneficios se producen cuando son combinadas dentro de modelos integrales. La información generada por sensores puede contribuir simultáneamente a mejorar la alimentación, la salud y la reproducción, mientras que el aprovechamiento de residuos puede disminuir impactos ambientales, recuperar nutrientes y generar energía para las explotaciones.

La ganadería de precisión y la inteligencia artificial representan algunas de las tendencias con mayor capacidad para modificar la gestión de los sistemas pecuarios. La recopilación continua de información puede facilitar la detección temprana de enfermedades, mejorar la supervisión del comportamiento, ajustar las dietas y apoyar la planificación reproductiva. No obstante, su expansión continúa condicionada por los costos, la disponibilidad de conectividad, la infraestructura tecnológica y las competencias necesarias para interpretar los datos. La calidad y representatividad de la información también determinan la confiabilidad de los modelos predictivos, especialmente cuando son trasladados a especies, territorios o modalidades productivas diferentes. A ello se suman desafíos relacionados con transparencia algorítmica, interoperabilidad, privacidad y propiedad de los datos. Por tanto, la digitalización debe entenderse como una herramienta de apoyo al conocimiento humano y no como un reemplazo de la experiencia de los productores, profesionales y trabajadores vinculados con el cuidado de los animales.

Las innovaciones nutricionales, ambientales y sanitarias también resultan indispensables para alcanzar sistemas sostenibles. La alimentación de precisión, el aprovechamiento de recursos locales y la utilización de subproductos pueden mejorar la eficiencia y disminuir determinadas pérdidas, siempre que sean nutricionalmente seguros y económicamente viables. La mitigación de emisiones requiere integrar alimentación, salud, eficiencia productiva, manejo del estiércol y gestión de pasturas, debido a que ninguna intervención individual puede resolver todos los impactos de la actividad. Del mismo modo, el compostaje, la biodigestión y la recuperación de nutrientes ofrecen oportunidades para transformar residuos en fertilizantes o energía, aunque sus costos y requerimientos técnicos deben adaptarse a cada escala productiva. La planificación del pastoreo, la incorporación de leguminosas y los sistemas silvopastoriles también pueden contribuir a conservar el suelo, favorecer la biodiversidad, generar sombra y fortalecer la resiliencia frente a la variabilidad climática.

La salud y el bienestar animal constituyen dimensiones inseparables de la sostenibilidad porque influyen directamente en la eficiencia, la productividad y la utilización de los recursos. La prevención de enfermedades, la bioseguridad, la

vigilancia epidemiológica y el uso responsable de medicamentos pueden disminuir pérdidas y reducir la necesidad de determinadas intervenciones terapéuticas. Las tecnologías digitales amplían las posibilidades de monitoreo, pero no sustituyen el diseño adecuado de las instalaciones, la alimentación suficiente, el manejo responsable ni la supervisión humana. Esta consideración resulta particularmente importante ante la expansión de sistemas automatizados que podrían privilegiar la eficiencia operativa sin atender suficientemente las necesidades biológicas y conductuales de los animales. En consecuencia, las innovaciones deben evaluarse no solamente por su capacidad para incrementar el rendimiento, sino también por sus efectos sobre la salud, el comportamiento, el estrés y las condiciones generales de vida.

Las principales barreras para la adopción comprenden los costos iniciales, la insuficiente conectividad rural, las limitaciones de infraestructura, la falta de capacitación, el acceso restringido al financiamiento, la incertidumbre sobre la rentabilidad y las dificultades de interoperabilidad. Estas condiciones afectan con mayor intensidad a los pequeños y medianos productores, quienes pueden quedar excluidos de la transformación tecnológica si no existen mecanismos específicos de apoyo. Por esta razón, las políticas públicas deben facilitar el acceso a financiamiento, asistencia técnica, investigación, capacitación e infraestructura digital. Los servicios compartidos, las cooperativas y las plataformas colectivas pueden representar alternativas para distribuir costos y ampliar el acceso, pero requieren coordinación institucional y modelos de gestión transparentes. La cooperación entre gobiernos, universidades, centros de investigación, empresas y organizaciones de productores será fundamental para desarrollar ecosistemas de innovación inclusivos y territorialmente pertinentes.

La revisión también permitió reconocer vacíos de conocimiento que deben orientar futuras investigaciones. Se necesitan estudios longitudinales que permitan determinar si los beneficios productivos y ambientales se mantienen durante periodos prolongados, así como investigaciones comparativas capaces de evaluar las innovaciones bajo diferentes condiciones climáticas, económicas y productivas. La evaluación no debe concentrarse exclusivamente en indicadores de rendimiento, sino incorporar emisiones totales, uso de agua y energía, salud del suelo, biodiversidad, bienestar animal, viabilidad económica y efectos sociales. También resulta necesario ampliar la evidencia procedente de países de ingresos bajos y medios, debido a que una parte importante de las tecnologías avanzadas ha sido desarrollada en explotaciones con mayor infraestructura y capacidad económica. La participación de los productores debe ocupar una posición central para garantizar que las innovaciones respondan a sus conocimientos, necesidades y posibilidades reales de implementación.

En síntesis, las innovaciones analizadas presentan un potencial significativo para contribuir a la transformación sostenible de los sistemas agroalimentarios, pero sus resultados dependerán de la manera en que se integren los avances tecnológicos con los procesos ecológicos, el bienestar animal, los conocimientos productivos y las políticas públicas. El futuro del sector requerirá sistemas pecuarios más eficientes en la utilización de los recursos, resilientes frente al cambio climático, responsables con los ecosistemas e inclusivos con los diferentes tipos de productores. Alcanzar estos objetivos demandará investigación interdisciplinaria, innovación continua, inversión, cooperación institucional y participación activa de los actores vinculados con la producción animal. La sostenibilidad no debe concebirse como un destino alcanzado mediante una solución definitiva, sino como un proceso permanente de aprendizaje, adaptación y mejoramiento de las relaciones entre producción, sociedad, animales y ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campbell, M., McKenzie, J. E., Sowden, A., Katikireddi, S. V., Brennan, S. E., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V., & Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: Reporting guideline. *BMJ*, 368, l6890. <https://doi.org/10.1136/bmj.l6890>

Collaboration for Environmental Evidence. (2022). Guidelines and standards for evidence synthesis in environmental management (Version 5.1; A. S. Pullin, G. K. Frampton, B. Livoreil, & G. Petrokofsky, Eds.). <https://environmentalevidence.org/information-for-authors/>

- European Commission. (2020). A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Climate-smart agriculture case studies 2021: Projects from around the world. <https://doi.org/10.4060/cb5359en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023a). Pathways towards lower emissions: A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023b). The state of food and agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023c). Sustainable livestock transformation: A vision for FAO's work on animal production and health. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc7474en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023d). Revealing the hidden costs of agrifood systems to enhance their value. FAO Agricultural Development Economics Policy Brief, 68. <https://doi.org/10.4060/cc8582en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.-a). Animal production. <https://www.fao.org/animal-production/en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.-b). Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM). <https://www.fao.org/gleam/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.-c). Livestock and the environment. <https://www.fao.org/livestock-environment/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.-d). Sustainable livestock. <https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/sustainable-livestock/en>
- International Livestock Research Institute. (2022, November 14). ILRI's Jimmy Smith on bringing science-based nuance and clarity to today's polarized livestock debates. <https://www.ilri.org/news/ilris-jimmy-smith-bringing-science-based-nuance-and-clarity-todays-polarized-livestock-debates>
- International Livestock Research Institute. (2023). Transitioning to more sustainable livestock systems through agricultural breakthroughs [Video]. <https://hdl.handle.net/10568/136019>
- Kennady, V., Banerjee, R. R., Dhulipala, R. K., & Paliwal, A. (2023, September 2). Unlocking the potential of India's livestock sector through digital and financial services. International Livestock Research Institute. <https://www.ilri.org/news/unlocking-potential-indias-livestock-sector-through-digital-and-financial-services>
- Organisation for Economic Co-operation and Development, & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). OECD-FAO agricultural outlook 2023–2032. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). Agricultural policy monitoring and evaluation 2022: Reforming agricultural policies for climate change mitigation. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/7f4542bf-en>

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021a). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021b). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Pullin, A. S., Cheng, S. H., Jackson, J. D., Eales, J., Envall, I., Fada, S. J., Frampton, G. K., Harper, M., Kadykalo, A. N., Kohl, C., Konno, K., Livoreil, B., Ouédraogo, D.-Y., O'Leary, B. C., Pullin, G., Randall, N., Rees, R., Smith, A., Sordello, R., ... Woodcock, P. (2022). Standards of conduct and reporting in evidence syntheses that could inform environmental policy and management decisions. *Environmental Evidence*, 11, Article 16. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00269-9>
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., Koffel, J. B., & PRISMA-S Group. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10, Article 39. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- World Bank. (2021, November 8). Future of food: Building stronger food systems in fragility, conflict, and violence settings. <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/publication/future-of-food-building-stronger-food-systems-fcv>
- World Bank. (n.d.). Climate-smart agriculture. <https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Rayo Vargas

Nombres de autores e iniciales:

Diego Alejandro Rayo Vargas (DARV)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (DARV)

Curación de datos: (DARV)

Análisis formal: (DARV)

Adquisición de fondos: (DARV)

Investigación: (DARV)

Metodología: (DARV)

Administración del proyecto: (DARV)

Recursos: No aplica

Software: (DARV)

Supervisión: (DARV)

Validación: (DARV)

Visualización: (DARV)

Redacción – Borrador original: (DARV)

Redacción – Revisión y edición: (DARV)