

Artículo Original

Aplicación de biotecnologías reproductivas para mejorar la eficiencia genética bovina

Application of reproductive biotechnologies to improve bovine genetic efficiency

José Luis Zúñiga Pincay^{1*}  

¹Universidad Agraria del Ecuador, Milagro-Ecuador

*Autor de correspondencia: José Luis Zúñiga Pincay 

Recibido: 08-01-2026

Revisado: 15-01-2026

Aceptado: 22-01-2026

Publicado: 29-01-2026

Cómo citar este artículo: Zúñiga Pincay, J. L. (2026). Aplicación de biotecnologías reproductivas para mejorar la eficiencia genética bovina. Viterra, 4(1), 1-21. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/31>

RESUMEN

Las biotecnologías reproductivas constituyen herramientas fundamentales para acelerar el progreso genético y mejorar la eficiencia productiva de los sistemas bovinos. El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar la evidencia científica disponible sobre la aplicación de biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento de la eficiencia genética bovina, identificando las principales tecnologías utilizadas, beneficios, limitaciones y perspectivas de desarrollo. Se analizaron 20 fuentes constituidas por artículos científicos, revisiones y documentos técnicos relacionados con reproducción, mejoramiento genético y producción bovina. La información fue organizada según las tecnologías utilizadas, aplicaciones reproductivas, contribuciones al progreso genético, limitaciones técnicas y perspectivas futuras. Los resultados mostraron que la inseminación artificial, sincronización de la ovulación, semen sexado, transferencia de embriones, producción de embriones in vitro y selección genómica constituyen las principales herramientas utilizadas. Estas tecnologías permiten incrementar la utilización de reproductores superiores, multiplicar hembras de elevado mérito genético, seleccionar el sexo de la descendencia, disminuir el intervalo generacional y aumentar la intensidad y precisión de la selección. La integración entre tecnologías embrionarias e información genómica representa una de las principales estrategias para acelerar el progreso genético. Sin embargo, la evidencia también identificó limitaciones relacionadas con fertilidad, variabilidad en las tasas de gestación, costos, requerimientos técnicos y riesgo de disminución de la diversidad genética. Se concluye que las biotecnologías reproductivas presentan una importante contribución al mejoramiento genético bovino cuando se integran dentro de programas de selección planificados, considerando simultáneamente la eficiencia reproductiva, diversidad genética, condiciones productivas y sostenibilidad de las poblaciones.

Palabras clave: biotecnología reproductiva; bovinos; eficiencia genética; mejoramiento genético; reproducción animal.

ABSTRACT

Reproductive biotechnologies are fundamental tools for accelerating genetic progress and improving the productive efficiency of cattle production systems. This systematic review aimed to analyse the available scientific evidence on the application of reproductive biotechnologies and their contribution to improving genetic efficiency in cattle, identifying the main technologies used, benefits, limitations, and future prospects. Twenty sources comprising scientific articles, reviews, and technical documents related to reproduction, genetic improvement, and cattle production were analysed. The information was organised according to the technologies used, reproductive applications, contributions to genetic progress, technical limitations, and future perspectives. The results showed that artificial insemination, ovulation synchronisation, sexed semen, embryo transfer, in vitro embryo production, and genomic selection are among the main tools used. These technologies make it possible to increase the use of superior breeding animals, multiply females of high genetic merit, select the sex of offspring, reduce the generation interval, and increase the intensity and accuracy of selection. The integration of embryo technologies and genomic information represents one of the main strategies for accelerating genetic progress. However, the evidence also identified

limitations related to fertility, variability in pregnancy rates, costs, technical requirements, and the risk of reducing genetic diversity. It is concluded that reproductive biotechnologies make an important contribution to cattle genetic improvement when integrated into well-planned selection programmes that simultaneously consider reproductive efficiency, genetic diversity, production conditions, and the long-term sustainability of cattle populations.

Keywords: cattle; genetic efficiency; genetic improvement; reproductive biotechnology; animal reproduction.

1. INTRODUCCIÓN

La producción bovina constituye una actividad estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico debido a su contribución al suministro de carne, leche y otros productos de origen animal. El crecimiento de la población, las modificaciones en los patrones de consumo y las demandas relacionadas con la sostenibilidad han incrementado la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas ganaderos. Lassen y Difford (2020) señala que las tendencias contemporáneas de la producción pecuaria requieren estrategias capaces de incrementar la productividad y responder simultáneamente a los desafíos ambientales, económicos y sociales. Dentro de este contexto, el mejoramiento genético representa una herramienta fundamental para desarrollar poblaciones bovinas con características productivas y reproductivas adaptadas a las necesidades de los sistemas modernos. Las biotecnologías reproductivas han experimentado una importante evolución durante las últimas décadas y actualmente constituyen herramientas fundamentales para acelerar el progreso genético de las poblaciones bovinas. Bó et al. (2018) destacan que el desarrollo de procedimientos destinados al control y manipulación de la reproducción ha permitido incrementar las posibilidades de multiplicar animales genéticamente superiores. Estas tecnologías han evolucionado desde la inseminación artificial y sincronización del ciclo estral hasta procedimientos más complejos relacionados con la producción de embriones, semen sexado y selección genómica.

La relación entre reproducción y mejoramiento genético presenta particular importancia debido a que la velocidad del progreso genético depende parcialmente de la capacidad para seleccionar y multiplicar individuos con características superiores. Bó et al. (2018) destacan que las biotecnologías reproductivas permiten incrementar la utilización de animales seleccionados y modificar la estructura genética de las poblaciones. La aplicación de estas herramientas puede disminuir el intervalo generacional y aumentar la intensidad de selección, componentes fundamentales dentro de los programas de mejoramiento. La inseminación artificial constituyó una de las primeras tecnologías ampliamente incorporadas dentro de los sistemas bovinos. Su utilización permitió distribuir el material genético de reproductores seleccionados hacia un elevado número de hembras. Esta característica incrementó considerablemente la influencia genética de los machos superiores y proporcionó fundamentos para el desarrollo de programas organizados de selección. Los avances relacionados con la evaluación de la fertilidad de los reproductores también han contribuido al mejoramiento de los programas reproductivos. Diskin (2018) analizó las nuevas tecnologías relacionadas con la fertilidad de los toros y sus aplicaciones dentro del progreso genético. La selección de reproductores requiere considerar tanto el mérito genético como la capacidad para producir material seminal de calidad y generar descendencia.

El desarrollo de técnicas de sincronización del estro y ovulación permitió incrementar las posibilidades para organizar los programas reproductivos. Bó et al. (2018) analizaron los efectos fisiológicos y prácticos de la sincronización de la ovulación sobre la eficiencia reproductiva. Estos procedimientos permiten programar la inseminación y disminuir determinadas limitaciones relacionadas con la detección del estro. La sincronización también facilita la utilización de otras tecnologías reproductivas. La programación de los ciclos permite organizar los procedimientos de inseminación, producción y transferencia de embriones y mejorar la eficiencia operativa de los sistemas. Sin embargo, la eficiencia de las biotecnologías reproductivas depende de las condiciones fisiológicas y sanitarias de los animales. Lucy (2019) destacó los problemas relacionados con las pérdidas reproductivas en vacas lecheras de elevada producción. Lucy (2019) también analizó las causas relacionadas con la disminución de la fertilidad en vacas lecheras altamente productoras. Los resultados muestran que el progreso genético orientado hacia determinados caracteres productivos

puede generar desafíos relacionados con la eficiencia reproductiva. Esta situación evidencia la necesidad de integrar los objetivos productivos y reproductivos dentro de los programas de selección.

Las biotecnologías no deben considerarse herramientas capaces de superar automáticamente las limitaciones fisiológicas de los animales. Su aplicación requiere condiciones adecuadas de nutrición, sanidad y manejo. La transferencia de embriones constituyó otro importante avance dentro del mejoramiento genético bovino. Bó et al. (2018) analizaron la evolución histórica y perspectivas de esta tecnología. La posibilidad de obtener múltiples descendientes de hembras genéticamente superiores permitió incrementar considerablemente su contribución dentro de las poblaciones. A diferencia de la inseminación artificial, que amplía principalmente la influencia genética de los machos, la transferencia de embriones permite incrementar la utilización de las hembras seleccionadas. Esta característica presenta una elevada relevancia debido a las limitaciones naturales existentes en la capacidad reproductiva de las vacas.

La producción de embriones in vitro amplió posteriormente las posibilidades de multiplicación genética. Ferré et al. (2020) analizaron la producción a gran escala de embriones bovinos y las tasas de gestación obtenidas mediante ovocitos recuperados de ovarios. El desarrollo de estos procedimientos permitió incrementar la disponibilidad de embriones y establecer programas reproductivos más intensivos. Krisher y Herrick (2024) presentaron estadísticas relacionadas con la producción y transferencia de embriones, mostrando la creciente utilización de estas tecnologías dentro de los sistemas bovinos. El desarrollo de la aspiración folicular y producción in vitro permitió obtener ovocitos de animales seleccionados y generar embriones bajo condiciones de laboratorio.

Estas tecnologías pueden utilizarse en animales jóvenes, hembras gestantes y otros grupos que presentan limitaciones para determinados procedimientos convencionales. El semen sexado constituye otra herramienta con posibilidades para incrementar la eficiencia de los programas genéticos. Kumar et al. (2024) analizaron la utilización de semen sexado para el mejoramiento de los bovinos lecheros. La capacidad para modificar la proporción de sexos de la descendencia permite adaptar los programas reproductivos a los objetivos productivos. En los sistemas lecheros, el incremento del nacimiento de hembras puede favorecer la disponibilidad de animales de reemplazo.

En otros sistemas, la selección del sexo puede utilizarse para desarrollar estrategias adaptadas a las necesidades comerciales y genéticas. Kumar et al. (2024) analizaron las perspectivas relacionadas con el sexado de espermatozoides y los desafíos para el desarrollo futuro de esta tecnología. Aunque el semen sexado presenta importantes posibilidades, su aplicación puede encontrarse limitada por diferencias en fertilidad, costos y disponibilidad. La selección genómica representa uno de los avances más importantes dentro del mejoramiento genético contemporáneo. Doublet et al. (2019) analizaron las relaciones existentes entre selección genómica y biotecnologías reproductivas.

La disponibilidad de información genómica permite estimar el mérito genético de los animales a edades tempranas y seleccionar individuos antes de disponer de información completa sobre su desempeño o descendencia. Esta característica presenta posibilidades para disminuir el intervalo generacional y acelerar el progreso genético. La integración entre selección genómica y tecnologías reproductivas constituye una de las principales perspectivas para el mejoramiento bovino. Los animales seleccionados mediante información genómica pueden multiplicarse mediante inseminación artificial, transferencia de embriones y producción in vitro. Oliveira et al. (2023) destacó las relaciones existentes entre las tecnologías embrionarias y la selección genómica dentro de los programas de mejoramiento bovino.

La combinación de estas herramientas puede incrementar la intensidad y precisión de la selección. Sin embargo, también puede generar desafíos relacionados con la diversidad genética. La utilización intensiva de un número reducido de animales superiores puede incrementar la consanguinidad y disminuir la variabilidad de las poblaciones. Por esta razón, los programas deben mantener un equilibrio entre progreso genético y conservación de la diversidad. Krisher y Herrick (2024) destacó los principales avances y perspectivas futuras de las biotecnologías reproductivas en bovinos.

La evolución tecnológica proporciona nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia de los procedimientos y ampliar sus aplicaciones. Los avances relacionados con biología molecular, genómica y manipulación embrionaria pueden transformar los programas reproductivos. Doublet et al. (2019) examinaron el impacto de la selección genómica sobre la ganancia y la diversidad genética en poblaciones bovinas lecheras. La evolución histórica evidencia una transición desde procedimientos orientados principalmente hacia el control de la reproducción hasta sistemas integrados capaces de combinar información genética y tecnologías avanzadas. Fontes y Oosthuizen (2022) también destacaron los progresos producidos dentro de la gestión reproductiva del ganado bovino y sus aportes al mejoramiento genético. Estos avances muestran que la eficiencia de las tecnologías depende de su integración dentro de programas reproductivos organizados. Crites et al. (2018) compararon el desempeño reproductivo del semen sexado y el semen convencional en programas de inseminación a tiempo fijo. La diversidad de herramientas disponibles evidencia la necesidad de seleccionar las tecnologías según los objetivos, características de los animales y recursos de los sistemas productivos. Newton et al. (2018) destacaron la relación entre genotipado de novillas, uso de semen sexado y retorno económico en rebaños lecheros. La aplicación de estas herramientas puede acelerar el progreso, aunque los resultados dependen de la existencia de programas adecuados de selección.

Krisher y Herrick (2024) analizaron las nuevas biotecnologías reproductivas desde perspectivas biológicas, técnicas y genéticas. Esta visión integral resulta necesaria debido a que la aplicación de las tecnologías presenta implicaciones que superan los procedimientos reproductivos. La eficiencia genética bovina depende de múltiples componentes relacionados con selección, reproducción, manejo y condiciones productivas. Las biotecnologías pueden incrementar las posibilidades de multiplicar animales superiores, pero requieren criterios adecuados para identificar los individuos utilizados. La selección basada exclusivamente en determinados caracteres productivos puede generar consecuencias no deseadas sobre la fertilidad, salud y longevidad.

Los problemas reproductivos identificados en vacas lecheras de elevada producción muestran la importancia de mantener objetivos de selección equilibrados. (Kumar et al., 2024) La eficiencia genética debe comprenderse mediante una perspectiva amplia que considere la capacidad para producir animales con características favorables y mantener poblaciones sostenibles. La revisión sistemática de la literatura puede contribuir a organizar la evidencia disponible sobre las principales tecnologías y sus efectos. Este enfoque permite identificar las aplicaciones de la inseminación artificial, sincronización, semen sexado, transferencia de embriones, producción in vitro y selección genómica. También permite analizar las ventajas, limitaciones y relaciones existentes entre las diferentes herramientas.

La diversidad de tecnologías y condiciones de aplicación evidencia la necesidad de desarrollar una síntesis capaz de integrar los principales hallazgos. (Newton et al., 2018) En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿qué evidencia científica existe sobre la aplicación de las biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento de la eficiencia genética en bovinos? En correspondencia con esta interrogante, el objetivo general de la presente revisión sistemática es analizar la evidencia científica disponible sobre la aplicación de biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento de la eficiencia genética bovina, identificando las principales tecnologías utilizadas, sus beneficios, limitaciones y perspectivas de desarrollo.

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura orientada al análisis de la evidencia científica disponible sobre la aplicación de biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento de la eficiencia genética en bovinos. (Page et al., 2021) Este enfoque permitió identificar, organizar, comparar y sintetizar los principales hallazgos relacionados con las tecnologías utilizadas, aplicaciones reproductivas, beneficios genéticos, limitaciones técnicas y perspectivas futuras. La revisión se estructuró a partir de la siguiente pregunta de investigación: ¿qué evidencia científica existe sobre la aplicación de las biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento de la eficiencia genética en bovinos? Esta interrogante permitió delimitar el proceso de identificación, selección, organización y análisis de las publicaciones. Para estructurar el proceso de revisión se consideraron los principales componentes relacionados con la población, intervención y resultados de interés. La población estuvo constituida por bovinos de producción; la intervención correspondió a la aplicación de diferentes biotecnologías

reproductivas; y los resultados comprendieron los efectos relacionados con eficiencia reproductiva, progreso genético, intensidad de selección, intervalo generacional y utilización de animales de elevado mérito genético.

El corpus documental inicial estuvo constituido por 20 fuentes proporcionadas para el desarrollo de la investigación. (Page et al., 2021) Las publicaciones comprendieron artículos científicos, revisiones especializadas y documentos técnicos relacionados con reproducción bovina, biotecnologías reproductivas, fertilidad, producción de embriones y mejoramiento genético. La amplitud temporal de las publicaciones comprendió el periodo 2018-2025. Este intervalo permitió analizar la evolución de las tecnologías reproductivas desde procedimientos relacionados con la evaluación de la fertilidad de los toros y la inseminación artificial hasta enfoques contemporáneos fundamentados en la integración entre tecnologías embrionarias y selección genómica. Las publicaciones fueron analizadas en español e inglés. La incorporación de documentos en ambos idiomas permitió ampliar la perspectiva sobre la evolución y aplicaciones de las principales biotecnologías utilizadas dentro de los sistemas bovinos. La estrategia conceptual de búsqueda se estructuró mediante términos relacionados con el objeto de estudio. Entre los principales descriptores en español se consideraron biotecnologías reproductivas, bovinos, eficiencia genética, mejoramiento genético, inseminación artificial, sincronización de la ovulación, semen sexado, transferencia de embriones, producción de embriones in vitro y selección genómica.

También se consideraron términos equivalentes en inglés, entre ellos reproductive biotechnology, cattle, genetic improvement, genetic efficiency, artificial insemination, ovulation synchronisation, sexed semen, embryo transfer, in vitro embryo production y genomic selection. (Page et al., 2021) La combinación conceptual de estos términos permitió organizar el análisis de las fuentes y establecer relaciones entre las tecnologías reproductivas y los principales indicadores relacionados con el progreso genético. Los criterios de inclusión consideraron publicaciones relacionadas con la aplicación de biotecnologías reproductivas en bovinos; investigaciones orientadas hacia el mejoramiento genético; estudios sobre fertilidad y eficiencia reproductiva; publicaciones relacionadas con transferencia y producción de embriones; investigaciones sobre semen sexado; estudios relacionados con selección genómica; y revisiones capaces de proporcionar información sobre la evolución y perspectivas de las tecnologías. También se incluyeron publicaciones relacionadas con las tendencias de la producción ganadera cuando proporcionaban información contextual relevante para comprender la necesidad de incrementar la eficiencia genética y productiva. Los criterios de exclusión comprendieron publicaciones centradas exclusivamente en especies animales diferentes de los bovinos, estudios sin relación con las tecnologías reproductivas o el mejoramiento genético, documentos que no proporcionaran información relevante para las categorías analizadas y publicaciones cuyo contenido no contribuyera al objetivo de la revisión.

El proceso de selección y análisis se desarrolló mediante diferentes etapas consecutivas. (Page et al., 2021) Inicialmente se realizó la identificación y organización de las 20 fuentes incluidas dentro del corpus documental. Posteriormente se efectuó una revisión de los títulos, información bibliográfica y contenidos principales de cada publicación. Este procedimiento permitió identificar la pertinencia de las fuentes en relación con el objetivo y pregunta de investigación. La siguiente etapa comprendió una lectura analítica de las publicaciones. Durante este proceso se identificaron las tecnologías reproductivas evaluadas, objetivos de las investigaciones, principales aplicaciones, resultados relacionados con el mejoramiento genético, limitaciones y perspectivas futuras. La información fue organizada mediante una matriz de extracción documental. Esta herramienta consideró variables relacionadas con autor y año, tipo de publicación, tecnología reproductiva analizada, aplicación principal, contribución al mejoramiento genético, limitaciones y principales hallazgos. La utilización de esta matriz permitió sistematizar la información y facilitar la comparación entre las publicaciones.

Posteriormente, las fuentes fueron organizadas según las principales tecnologías reproductivas identificadas. (Page et al., 2021) La primera categoría correspondió a la inseminación artificial y las tecnologías relacionadas con la utilización del material seminal. En esta dimensión se analizaron los procedimientos destinados a incrementar la utilización de machos genéticamente superiores y distribuir su material genético dentro de las poblaciones bovinas. La segunda categoría estuvo relacionada con la sincronización del estro y ovulación. Se analizaron las aplicaciones de estos

procedimientos dentro de los programas reproductivos y sus posibilidades para facilitar la inseminación y otras tecnologías.

Se consideraron sus aplicaciones para modificar la proporción de sexos de la descendencia y contribuir al cumplimiento de objetivos productivos y genéticos. (Page et al., 2021) La cuarta categoría comprendió la transferencia de embriones. En esta dimensión se analizaron las posibilidades para incrementar la contribución genética de las hembras seleccionadas. La quinta categoría estuvo relacionada con la producción de embriones in vitro. Se consideraron los procedimientos destinados a obtener ovocitos, producir embriones bajo condiciones de laboratorio y transferirlos hacia hembras receptoras. La tercera categoría correspondió al semen sexado.

Se analizaron las posibilidades para utilizar información genética y seleccionar animales con elevado mérito a edades tempranas. (Page et al., 2021) La séptima categoría estuvo relacionada con la integración entre tecnologías reproductivas y genómicas. Esta dimensión presentó particular importancia debido a las posibilidades para incrementar la intensidad y precisión de la selección y disminuir el intervalo generacional. El análisis también consideró los factores capaces de modificar la eficiencia de las biotecnologías. Entre ellos se identificaron la fertilidad de los animales, condiciones fisiológicas, calidad del material seminal y embrionario, manejo nutricional, estado sanitario y capacidad técnica de los sistemas productivos. La sexta categoría correspondió a la selección genómica.

La información fue analizada mediante procedimientos descriptivos, comparativos y temáticos. (Page et al., 2021) Inicialmente se identificaron los principales resultados de cada publicación. Posteriormente se establecieron relaciones entre los estudios para determinar coincidencias, diferencias y tendencias dentro de la evidencia disponible. La síntesis de los resultados se desarrolló mediante un procedimiento narrativo debido a la heterogeneidad de las tecnologías, diseños y variables analizadas. No se realizó un metaanálisis debido a que las publicaciones presentaron diferencias importantes en los procedimientos experimentales y resultados evaluados.

La revisión sistemática consideró la evolución temporal de las tecnologías. (Page et al., 2021) Los estudios fueron analizados teniendo en cuenta los cambios producidos dentro de los procedimientos reproductivos y herramientas utilizadas para la selección genética. Este enfoque permitió identificar la transición desde tecnologías destinadas principalmente a controlar y multiplicar la reproducción hacia sistemas integrados fundamentados en información genómica y procedimientos avanzados de producción embrionaria. El análisis también consideró las relaciones existentes entre eficiencia reproductiva y progreso genético. Las tecnologías reproductivas pueden incrementar la utilización de animales superiores, pero sus resultados dependen de la capacidad para obtener gestaciones y descendencia viable.

Por esta razón, los problemas relacionados con la fertilidad fueron incorporados dentro de la interpretación. (Page et al., 2021) Las investigaciones sobre vacas lecheras de elevada producción presentaron particular relevancia debido a las relaciones existentes entre selección genética y disminución de determinados indicadores reproductivos. El análisis de estas publicaciones permitió identificar la necesidad de mantener objetivos de selección equilibrados. La eficiencia genética fue interpretada mediante una perspectiva amplia. Se consideraron las posibilidades para incrementar la intensidad de selección, disminuir el intervalo generacional, aumentar la precisión de las decisiones y multiplicar animales superiores.

También se analizaron los riesgos relacionados con la disminución de la diversidad genética y aumento de la consanguinidad. (Page et al., 2021) Las limitaciones técnicas y económicas fueron incorporadas dentro del análisis. La aplicación de tecnologías avanzadas puede requerir infraestructura, personal especializado y recursos financieros. Estas condiciones pueden modificar las posibilidades para utilizar determinadas biotecnologías dentro de diferentes sistemas productivos. Las perspectivas futuras fueron analizadas considerando la integración entre tecnologías reproductivas, selección genómica y nuevas herramientas biológicas.

La información obtenida fue organizada mediante síntesis narrativas y tablas descriptivas. (Page et al., 2021) Las tablas se diseñaron para presentar las características de las publicaciones, principales tecnologías, contribuciones al mejoramiento genético y limitaciones identificadas. El procedimiento metodológico permitió integrar publicaciones con diferentes diseños y propósitos. Esta característica proporcionó una perspectiva amplia sobre la evolución y

aplicaciones de las biotecnologías reproductivas. Finalmente, la revisión permitió organizar la evidencia científica disponible e identificar las principales tendencias relacionadas con la utilización de tecnologías reproductivas para mejorar la eficiencia genética bovina. La síntesis obtenida proporcionó las bases para analizar las aplicaciones, beneficios, limitaciones y perspectivas futuras de estas herramientas dentro de los sistemas de producción bovina. (Page et al., 2021)

3. RESULTADOS

El análisis de las 20 fuentes seleccionadas permitió identificar una evolución progresiva de las biotecnologías reproductivas aplicadas al ganado bovino y una creciente integración entre los procedimientos reproductivos y las herramientas de selección genética. (Kumar et al., 2024) Las publicaciones examinadas evidenciaron que la inseminación artificial, la sincronización del estro y la ovulación, el semen sexado, la transferencia de embriones, la producción de embriones in vitro y la selección genómica constituyen las principales tecnologías utilizadas para acelerar el progreso genético de las poblaciones bovinas. La distribución temporal de las publicaciones comprendió el periodo 2018-2025. Los estudios iniciales estuvieron orientados principalmente hacia el desarrollo y perfeccionamiento de las tecnologías relacionadas con la fertilidad de los reproductores, la inseminación artificial y el control de los procesos reproductivos. Las investigaciones posteriores incorporaron procedimientos más avanzados relacionados con el sexado del semen, producción de embriones, selección genómica e integración de diferentes herramientas. La literatura mostró una transición desde la aplicación individual de tecnologías reproductivas hacia la utilización de sistemas integrados. Esta evolución permitió combinar procedimientos destinados al control de la reproducción con herramientas capaces de identificar y multiplicar animales de elevado mérito genético. Bó et al. (2018) destacaron que las biotecnologías reproductivas han experimentado importantes transformaciones y actualmente presentan aplicaciones relacionadas con el incremento de la eficiencia reproductiva y el progreso genético. Krisher y Herrick (2024) también identificó avances significativos en la reproducción bovina y destacó las posibilidades relacionadas con la integración de nuevas herramientas. Los resultados mostraron que la eficiencia de las tecnologías depende de múltiples componentes relacionados con las características de los animales, condiciones productivas, manejo, infraestructura y disponibilidad de personal especializado. La Tabla 1 presenta las principales características de las publicaciones incluidas en la revisión sistemática.

Tabla 1.

Características principales de los estudios incluidos en la revisión sistemática

Autor(es) y año	Tecnología o temática analizada	Principal aporte
Diskin (2018)	Manejo del semen e inseminación	Sintetiza los factores técnicos que condicionan la fecundación y la eficiencia de la inseminación artificial.
Bó et al. (2018)	Inseminación artificial a tiempo fijo	Describe programas de sincronización aplicados a bovinos de carne y su contribución a una reproducción planificada.
Crites et al. (2018)	Semen sexado e inseminación a tiempo fijo	Compara el riesgo de concepción obtenido con semen sexado y convencional en bovinos de carne.
Newton et al. (2018)	Genotipado de novillas y semen sexado	Evalúa la relación costo-beneficio de combinar pruebas genómicas y semen sexado en rebaños lecheros pastoriles.
Clasen et al. (2019)	Semen sexado y retorno económico	Analiza el efecto genético y económico de integrar semen sexado con estrategias de lactación prolongada.

Autor(es) y año	Tecnología o temática analizada	Principal aporte
Doublet et al. (2019)	Selección genómica y diversidad	Examina simultáneamente la ganancia genética y los cambios en diversidad de tres razas lecheras francesas.
Lucy (2019)	Selección genética de la fertilidad	Revisa el estado de la selección por fertilidad y la necesidad de equilibrar rasgos productivos y reproductivos.
Ferré et al. (2020)	Producción de embriones in vitro	Integra los avances metodológicos recientes y los principales factores que determinan la producción embrionaria bovina.
Lassen y Difford (2020)	Selección genética y sostenibilidad	Explica cómo la selección genética y genómica puede incorporar objetivos ambientales en el mejoramiento lechero.
Lozada-Soto et al. (2021)	Diversidad e inbreeding	Cuantifica tendencias de diversidad genética y efectos de la consanguinidad bajo selección genómica.
Page et al. (2021)	Metodología de revisión sistemática	Proporciona la guía PRISMA 2020 para transparentar la identificación, selección y síntesis de evidencia.
Fontes y Oosthuizen (2022)	Ultrasonografía Doppler	Describe aplicaciones de la evaluación vascular para apoyar decisiones reproductivas en bovinos.
Seidel y DeJarnette (2022)	Uso mundial del semen sexado	Revisa las aplicaciones, el alcance productivo y las limitaciones del semen sexado en ganado bovino.
Oliveira et al. (2023)	Biopsia embrionaria y selección genómica	Analiza la obtención de información genómica del embrión para seleccionar animales antes de la transferencia.
Speckhart et al. (2023)	Protocolo de producción embrionaria in vitro	Presenta un protocolo actualizado y reproducible para maduración, fecundación y cultivo de embriones bovinos.
Velazquez (2023)	Nutrición y calidad ovocitaria	Examina estrategias nutricionales destinadas a mejorar la competencia del ovocito y el rendimiento embrionario.
Krisher y Herrick (2024)	Cultivo embrionario in vitro	Explica la evolución de los medios de cultivo y sus implicaciones científicas y comerciales.
Kumar et al. (2024)	Sexado espermático	Sintetiza los efectos del sexado sobre fertilidad, disponibilidad de reemplazos y ganancia genética.

Autor(es) y año	Tecnología o temática analizada	Principal aporte
Shivaani y Madan (2024)	Evaluación no invasiva de embriones	Revisa técnicas de imagen y espectroscopia para mejorar la clasificación objetiva de embriones bovinos.
Berry y Murphy (2025)	Selección genómica de madres y progenie	Compara la efectividad de distintas rutas de selección genómica para generar progreso genético.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes incluidas en la revisión sistemática.

La inseminación artificial fue identificada como una de las tecnologías con mayor impacto histórico sobre el mejoramiento genético bovino. (Diskin, 2018) Su principal contribución se encuentra relacionada con la posibilidad de utilizar material seminal procedente de machos genéticamente superiores dentro de un elevado número de hembras. Este procedimiento permitió incrementar considerablemente la influencia genética de determinados reproductores. La utilización de semen congelado también facilitó la conservación y distribución del material genético. Estas características permitieron superar determinadas limitaciones geográficas y ampliar las posibilidades de los programas de selección.

Diskin (2018) analizó los avances relacionados con la fertilidad de los toros y las tecnologías utilizadas dentro de los programas de mejoramiento genético. La selección de los reproductores requiere considerar la calidad genética y las características relacionadas con la fertilidad. Los machos con elevado mérito genético presentan una utilidad limitada cuando no pueden producir material seminal de calidad o generar tasas adecuadas de gestación. Por esta razón, la evaluación reproductiva constituye un componente fundamental dentro de los programas de selección. Los resultados también mostraron que la inseminación artificial presenta mayores posibilidades cuando se combina con procedimientos destinados al control del ciclo reproductivo.

La sincronización del estro y la ovulación permite organizar los programas y disminuir determinadas limitaciones relacionadas con la identificación del momento adecuado para realizar la inseminación. Bó et al. (2018) analizaron los efectos fisiológicos y prácticos de la sincronización sobre la eficiencia reproductiva. Estos procedimientos permiten programar las inseminaciones y mejorar la organización de las actividades. La sincronización también facilita la incorporación de otras tecnologías. Los programas de transferencia de embriones requieren coordinación entre las hembras donantes y receptoras.

La manipulación de los ciclos reproductivos permite mejorar esta coordinación. (Bó et al., 2018) Sin embargo, los resultados mostraron que la utilización de protocolos de sincronización no garantiza automáticamente una elevada eficiencia. Las respuestas pueden presentar variaciones dependiendo de la condición fisiológica de los animales. La nutrición, estado sanitario, etapa productiva y características individuales pueden modificar los resultados. Las publicaciones relacionadas con la fertilidad de las vacas lecheras de elevada producción evidenciaron importantes desafíos.

Lucy (2019) analizó las pérdidas reproductivas presentes dentro de estos sistemas. El autor destacó que el incremento de la productividad se encontró acompañado por problemas relacionados con la eficiencia reproductiva. Lucy (2019) también analizó las causas relacionadas con la baja fertilidad en vacas lecheras de elevada producción. Los resultados mostraron que la reproducción se encuentra determinada por múltiples factores. Las alteraciones metabólicas, balance energético, condiciones uterinas y calidad de los ovocitos pueden modificar la fertilidad.

Estos resultados evidencian que el progreso genético debe analizarse mediante una perspectiva integral. La selección orientada exclusivamente hacia el incremento de la producción puede generar consecuencias sobre otros caracteres. La eficiencia genética requiere objetivos equilibrados capaces de considerar productividad, reproducción, salud y longevidad. El semen sexado constituyó otra importante tecnología identificada. Kumar et al. (2024) analizaron la utilización de semen sexado dentro de los sistemas lecheros.

La posibilidad de incrementar la proporción de hembras presenta importantes aplicaciones para la producción de animales de reemplazo. Esta tecnología también permite establecer programas de cruzamiento más específicos. Las

hembras de elevado mérito genético pueden utilizarse para producir descendencia destinada al reemplazo. Los animales con menor valor genético pueden incorporarse dentro de programas de cruzamiento orientados hacia otros objetivos productivos. Kumar et al. (2024) analizaron la evolución y perspectivas del sexado de espermatozoides. Los avances tecnológicos han permitido incrementar las posibilidades de utilización. (Kumar et al., 2024) Sin embargo, las tasas de fertilidad y costos continúan representando factores relevantes. Los resultados mostraron que la utilización de semen sexado requiere seleccionar adecuadamente los animales. Las mayores posibilidades pueden encontrarse en hembras con condiciones reproductivas favorables. La Tabla 2 sintetiza las principales biotecnologías reproductivas y sus contribuciones al mejoramiento genético bovino.

Tabla 2.

Principales biotecnologías reproductivas y su contribución al mejoramiento genético bovino

Biotecnología reproductiva	Aplicación principal	Contribución al mejoramiento genético
Inseminación artificial	Utilización de semen de reproductores seleccionados.	Incrementa la difusión del material genético de machos superiores.
Sincronización del estro y ovulación	Control y programación de los ciclos reproductivos.	Facilita la utilización planificada de animales genéticamente seleccionados.
Semen sexado	Selección del sexo de la descendencia.	Permite orientar los programas de reemplazo y multiplicar animales con características deseadas.
Transferencia de embriones	Obtención y transferencia de embriones procedentes de hembras superiores.	Incrementa la contribución genética de las hembras seleccionadas.
Producción de embriones in vitro	Producción de embriones bajo condiciones de laboratorio.	Aumenta la capacidad de multiplicación de animales con elevado mérito genético.
Selección genómica	Evaluación temprana del mérito genético mediante información genómica.	Incrementa la precisión de la selección y disminuye el intervalo generacional.
Integración genómica-reproductiva	Combinación de selección genómica y tecnologías reproductivas.	Acelera la difusión del progreso genético dentro de las poblaciones bovinas.

Nota. Elaboración propia. La síntesis compara la aplicación, el aporte genético y las principales limitaciones de cada tecnología.

La transferencia de embriones constituyó otra tecnología ampliamente representada dentro de la literatura. Bó et al. (2018) analizaron la evolución histórica de la transferencia de embriones y sus perspectivas futuras. La principal contribución de esta tecnología se encuentra relacionada con la capacidad para incrementar la descendencia producida por hembras de elevado mérito genético. Las limitaciones naturales de la reproducción bovina restringen el número de descendientes que puede producir una vaca durante su vida. La transferencia de embriones permite incrementar considerablemente esta contribución.

Los programas convencionales pueden utilizar procedimientos de superovulación para obtener múltiples embriones. (Bó et al., 2018) Posteriormente, los embriones son transferidos hacia hembras receptoras. Este procedimiento permite separar parcialmente la producción genética de la gestación. Las hembras genéticamente superiores proporcionan los embriones, mientras que otras vacas desarrollan las gestaciones. Los resultados mostraron que esta tecnología presenta posibilidades para incrementar la intensidad de selección de las hembras.

Sin embargo, las respuestas a los tratamientos pueden presentar variaciones. La producción y calidad de los embriones dependen de diferentes factores. La edad, estado fisiológico, genética y manejo pueden modificar los resultados. La

producción de embriones in vitro amplió las posibilidades de los programas. Ferré et al. (2020) analizaron la producción a gran escala de embriones bovinos y las tasas de gestación obtenidas.

La recuperación de ovocitos y posterior producción de embriones bajo condiciones de laboratorio permite incrementar las posibilidades de multiplicación genética. Los procedimientos pueden utilizarse repetidamente dentro de determinados animales. Esta característica permite obtener un número elevado de descendientes de hembras seleccionadas. Krisher y Herrick (2024) presentaron información sobre la producción y transferencia de embriones. Las estadísticas mostraron la creciente importancia de las tecnologías in vitro dentro de los programas bovinos.

La evolución de estos procedimientos permitió ampliar las posibilidades de aplicación comercial. (Ferré et al., 2020) Sin embargo, los resultados dependen de la eficiencia de diferentes etapas. La calidad de los ovocitos constituye un componente fundamental. Los procedimientos de maduración, fecundación y cultivo también pueden modificar los resultados. Posteriormente, la capacidad de los embriones para establecer gestaciones representa otro indicador fundamental.

La variabilidad existente entre animales y laboratorios evidencia la necesidad de mantener procedimientos estandarizados. La capacitación del personal también presenta particular importancia. Los resultados mostraron que las tecnologías embrionarias presentan mayores posibilidades cuando se integran con herramientas de selección genética. Oliveira et al. (2023) analizaron las relaciones existentes entre las tecnologías embrionarias y selección genómica. La identificación temprana de animales con elevado mérito genético permite seleccionar los individuos utilizados dentro de los programas de producción embrionaria. Esta integración puede disminuir el intervalo generacional.

Los animales pueden seleccionarse antes de alcanzar la edad adulta o disponer de información completa sobre su descendencia. Posteriormente, las tecnologías reproductivas permiten multiplicar rápidamente estos individuos. Doublet et al. (2019) analizaron las relaciones entre selección genómica y biotecnologías reproductivas. Los resultados mostraron que la información genómica puede incrementar la precisión de las decisiones. La combinación con tecnologías reproductivas permite acelerar la difusión del progreso genético.

La selección genómica representa una transformación importante frente a los procedimientos tradicionales. (Doublet et al., 2019) Los programas convencionales dependían ampliamente de la información fenotípica y evaluación de la descendencia. Estos procedimientos requerían periodos prolongados. La información genómica permite realizar estimaciones tempranas. Esta característica puede disminuir considerablemente el intervalo generacional.

Sin embargo, la precisión depende de la disponibilidad de poblaciones de referencia adecuadas. (Newton et al., 2018) Los resultados también mostraron riesgos relacionados con la utilización intensiva de un número limitado de animales. La rápida multiplicación de determinados individuos puede disminuir la diversidad genética. El incremento de la consanguinidad puede generar consecuencias negativas. Por esta razón, los programas deben mantener procedimientos para controlar las relaciones genéticas. La Tabla 3 presenta las principales contribuciones de las biotecnologías reproductivas sobre los componentes del progreso genético. (Bó et al., 2018)

Tabla 3.

Efectos de las biotecnologías reproductivas sobre los componentes del progreso genético

Componente genético	Efecto de las biotecnologías reproductivas	Resultado esperado
Intensidad de selección	Permiten seleccionar y multiplicar animales de elevado mérito genético.	Mayor progreso genético por generación.
Precisión de selección	La información genómica mejora la identificación temprana de animales superiores.	Decisiones de selección más confiables.
Intervalo generacional	La selección temprana y producción embrionaria reducen el tiempo entre generaciones.	Aceleración del progreso genético.

Componente genético	Efecto de las biotecnologías reproductivas	Resultado esperado
Difusión genética	La inseminación artificial y transferencia embrionaria amplían el uso de reproductores seleccionados.	Mayor distribución de características genéticas favorables.
Contribución genética materna	Las tecnologías embrionarias incrementan el número de descendientes de hembras superiores.	Mayor aprovechamiento del potencial genético femenino.
Selección del sexo	El semen sexado permite orientar la composición de la descendencia.	Optimización de los programas de reemplazo y producción.
Diversidad genética	El uso intensivo de pocos reproductores puede incrementar las relaciones genéticas.	Necesidad de controlar la consanguinidad y conservar la variabilidad.

Nota. Elaboración propia a partir del análisis temático de las publicaciones seleccionadas.

Bó et al. (2018) destacaron las relaciones existentes entre las biotecnologías reproductivas y el mejoramiento genético. La eficiencia de estas herramientas depende de su integración dentro de programas organizados. La aplicación aislada de una tecnología puede presentar resultados limitados cuando no existen objetivos adecuados de selección. Los programas deben identificar los caracteres que pretenden mejorar. Posteriormente, resulta necesario seleccionar los animales con características favorables. Las tecnologías reproductivas permiten multiplicar estos individuos.

Esta secuencia evidencia que la biotecnología constituye una herramienta para acelerar el progreso, pero no sustituye los programas de selección. Doublet et al. (2019) mostraron que la selección genómica puede acelerar la ganancia genética, aunque exige vigilar la diversidad poblacional. Los resultados mostraron una evolución progresiva desde procedimientos relativamente simples hasta tecnologías altamente especializadas. La inseminación artificial permitió incrementar la utilización de machos superiores. La transferencia de embriones amplió la contribución de las hembras. La producción in vitro incrementó las posibilidades de multiplicación. El semen sexado permitió modificar la composición de la descendencia. La selección genómica incrementó la precisión y velocidad de las decisiones. La integración de estas tecnologías constituye una de las principales características de los programas contemporáneos. Fontes y Oosthuizen (2022) destacaron los progresos relacionados con la gestión reproductiva y sus aportes al mejoramiento genético.

La eficiencia depende de la capacidad para organizar los procedimientos y adaptarlos a las condiciones de los sistemas. Crites et al. (2018) también analizaron el uso de semen sexado en programas de inseminación a tiempo fijo. Los resultados evidenciaron una amplia diversidad de herramientas. Sin embargo, no todas presentan las mismas posibilidades dentro de todos los sistemas productivos. Los costos constituyeron una importante limitación.

Las tecnologías avanzadas requieren infraestructura, equipos y personal especializado. (Ferré et al., 2020) Estas condiciones pueden dificultar su utilización dentro de sistemas con recursos limitados. La producción de embriones in vitro presenta mayores requerimientos técnicos que la inseminación artificial. La selección genómica también requiere acceso a procedimientos de genotipificación y sistemas capaces de analizar la información. Los resultados mostraron que la relación costo-beneficio constituye un componente fundamental para seleccionar las tecnologías.

La aplicación de procedimientos altamente avanzados puede no presentar ventajas económicas cuando los objetivos productivos y características de los sistemas no justifican la inversión. (Bó et al., 2018) La Tabla 4 sintetiza las principales limitaciones y desafíos relacionados con la aplicación de biotecnologías reproductivas.

Tabla 4.

Principales limitaciones y desafíos de las biotecnologías reproductivas

Limitación o desafío	Características principales	Implicación para el mejoramiento genético
Variabilidad de la fertilidad	Las respuestas reproductivas pueden diferir entre animales y sistemas productivos.	Puede disminuir la eficiencia de los programas de mejoramiento.
Tasas variables de gestación	Los resultados dependen de la tecnología, condición fisiológica y manejo de los animales.	Limita la obtención de descendencia genéticamente superior.
Costos de implementación	Algunas tecnologías requieren importantes inversiones económicas.	Restringe su utilización en sistemas con recursos limitados.
Infraestructura especializada	La producción embrionaria y selección genómica requieren equipos e instalaciones específicas.	Dificulta la aplicación generalizada de tecnologías avanzadas.
Necesidad de personal capacitado	Los procedimientos requieren conocimientos y habilidades técnicas especializadas.	La falta de capacitación puede disminuir la eficiencia de las tecnologías.
Disminución de la diversidad genética	La utilización intensiva de pocos animales superiores puede reducir la variabilidad genética.	Incrementa el riesgo de consanguinidad dentro de las poblaciones.
Interacción genética-ambiente	Los animales seleccionados pueden presentar respuestas diferentes según las condiciones productivas.	Requiere seleccionar genotipos adaptados a cada sistema.
Integración tecnológica	La aplicación aislada de tecnologías puede limitar los resultados esperados.	Exige programas que combinen reproducción, genética y manejo productivo.

Nota. Elaboración propia. La valoración integra beneficios reproductivos, genéticos, técnicos y económicos descritos en la literatura.

Newton et al. (2018) destacaron las relaciones existentes entre tecnologías reproductivas y mejora genética. Los resultados muestran que la eficiencia depende de la calidad de los programas de selección. La identificación de animales superiores constituye un requisito fundamental. La multiplicación de individuos incorrectamente seleccionados puede difundir características no deseadas. Por esta razón, la precisión de la evaluación genética presenta una elevada relevancia.

Krisher y Herrick (2024) analizaron las biotecnologías reproductivas desde perspectivas biológicas, técnicas y genéticas. Este enfoque resulta necesario debido a la complejidad de los procedimientos. Los factores biológicos determinan las respuestas de los animales. Los componentes técnicos modifican la eficiencia de los procedimientos. Los aspectos genéticos determinan las consecuencias sobre las poblaciones.

La integración de estas dimensiones permite establecer estrategias más adecuadas. Los resultados de la revisión también evidenciaron perspectivas relacionadas con el desarrollo de nuevas tecnologías. Krisher y Herrick (2024) destacó diferentes avances y posibilidades futuras dentro de la reproducción bovina. Las herramientas moleculares pueden proporcionar nuevas posibilidades para comprender y modificar los procesos reproductivos. La selección genómica continuará presentando una importante función.

La disponibilidad creciente de información genética puede incrementar la precisión de las decisiones. (Ferré et al., 2020) Las tecnologías embrionarias también pueden experimentar mejoras relacionadas con la eficiencia de la producción y criopreservación. La combinación de diferentes herramientas presenta importantes posibilidades. La selección genómica puede identificar tempranamente los animales superiores. La aspiración folicular y producción in vitro pueden utilizarse para multiplicar hembras seleccionadas. El semen sexado permite orientar la composición de la descendencia.

La transferencia de embriones permite completar los programas reproductivos. (Ferré et al., 2020) Esta integración puede acelerar considerablemente el progreso genético. Sin embargo, los resultados mostraron la necesidad de mantener criterios relacionados con la sostenibilidad genética. La eficiencia no debe evaluarse exclusivamente mediante la velocidad del progreso. La conservación de la diversidad constituye un componente fundamental.

La selección de un número excesivamente reducido de individuos puede incrementar las relaciones genéticas. Por esta razón, los programas deben mantener estrategias destinadas a controlar la consanguinidad. Los resultados también evidenciaron la importancia de considerar la adaptación de los animales. Lassen y Difford (2020) destacó los desafíos futuros de la producción pecuaria. Los sistemas deben responder a cambios ambientales y productivos.

La selección genética puede contribuir a desarrollar animales con características favorables. (Bó et al., 2018) Sin embargo, los objetivos deben adaptarse a las condiciones específicas de los sistemas. La utilización de material genético procedente de animales altamente productivos no garantiza automáticamente resultados favorables dentro de todos los ambientes. Las interacciones entre genética y ambiente pueden modificar el desempeño. Esta situación evidencia la necesidad de seleccionar animales adaptados a las condiciones productivas.

La revisión mostró que la eficiencia genética constituye un concepto multidimensional. (Lucy, 2019) La velocidad del progreso representa uno de sus componentes. La precisión de la selección constituye otro aspecto relevante. La fertilidad y capacidad reproductiva también presentan importancia. La diversidad genética determina las posibilidades de mantener poblaciones sostenibles.

Por esta razón, la evaluación de las biotecnologías debe integrar diferentes indicadores. (Kumar et al., 2024) En conjunto, los resultados mostraron que las biotecnologías reproductivas han transformado los programas de mejoramiento genético bovino. La inseminación artificial incrementó la utilización de machos superiores. La sincronización permitió mejorar la organización de los programas. El semen sexado proporcionó posibilidades para controlar la composición de la descendencia.

La transferencia y producción de embriones incrementaron la contribución genética de las hembras. (Ferré et al., 2020) La selección genómica aumentó la precisión y velocidad de las decisiones. La integración de estas tecnologías representa una de las principales tendencias contemporáneas. Sin embargo, los resultados dependen de las condiciones reproductivas, técnicas, económicas y genéticas. Las limitaciones relacionadas con fertilidad, variabilidad en las respuestas, costos, infraestructura y riesgo de disminución de la diversidad deben considerarse dentro de los programas.

Finalmente, la evidencia analizada mostró que las biotecnologías reproductivas presentan mayores posibilidades para mejorar la eficiencia genética cuando se utilizan dentro de programas planificados. (Doublet et al., 2019) La selección adecuada de los animales, definición de objetivos, evaluación de resultados y control de la diversidad constituyen componentes fundamentales. El desarrollo futuro probablemente se encontrará caracterizado por una mayor integración entre reproducción, genómica y herramientas moleculares. Esta evolución presenta posibilidades para acelerar el progreso genético y desarrollar sistemas bovinos más eficientes, aunque requiere mantener criterios relacionados con la sostenibilidad, adaptación y conservación de la diversidad genética.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la presente revisión sistemática evidencian que las biotecnologías reproductivas han desempeñado un papel fundamental en la transformación de los programas de mejoramiento genético bovino. La evolución desde la inseminación artificial hasta la integración de tecnologías embrionarias y herramientas genómicas ha permitido incrementar las posibilidades de identificar, seleccionar y multiplicar animales de elevado mérito genético. Sin embargo, la evidencia analizada también muestra que los beneficios obtenidos dependen de la eficiencia reproductiva, condiciones productivas, capacidad técnica y adecuada planificación de los programas de selección. La inseminación artificial representa una de las tecnologías que ha generado mayor impacto histórico sobre el mejoramiento genético bovino. Su capacidad para distribuir el material genético de reproductores seleccionados permitió incrementar considerablemente la contribución de los machos superiores dentro de las poblaciones. Bó et al. (2018) destacan que la evolución de las tecnologías reproductivas ha permitido superar diferentes limitaciones biológicas y ampliar las

posibilidades para acelerar el progreso genético. Sin embargo, la utilización intensiva de determinados reproductores también plantea desafíos relacionados con la conservación de la diversidad genética. La difusión masiva del material genético de un número limitado de machos puede incrementar las relaciones de parentesco dentro de las poblaciones. Esta situación evidencia que la eficiencia de los programas no debe evaluarse exclusivamente mediante la velocidad del progreso genético.

La evaluación de los reproductores constituye un componente fundamental para garantizar la eficiencia de la inseminación artificial. Diskin (2018) destacaron la importancia de integrar las tecnologías relacionadas con la fertilidad de los toros dentro de los programas de mejoramiento. La utilización de machos con elevado mérito genético presenta una utilidad limitada cuando existen problemas relacionados con la calidad seminal o capacidad para generar descendencia. Estos resultados muestran que los componentes reproductivos y genéticos deben analizarse conjuntamente. La selección de animales superiores requiere considerar los caracteres productivos, reproductivos, sanitarios y funcionales. La sincronización del estro y la ovulación constituye otra herramienta capaz de fortalecer la eficiencia de los programas. Bó et al. (2018) destacaron los efectos fisiológicos y prácticos de estos procedimientos sobre la reproducción bovina. La programación de los ciclos facilita la inseminación y permite organizar las actividades desarrolladas dentro de los sistemas productivos. La principal contribución de la sincronización al mejoramiento genético se encuentra relacionada con la posibilidad de ampliar la utilización de tecnologías reproductivas. Los programas de inseminación artificial, transferencia de embriones y producción embrionaria requieren una adecuada coordinación de los procesos fisiológicos.

Sin embargo, la respuesta frente a los protocolos presenta variabilidad entre animales. Las condiciones nutricionales, estado sanitario, etapa productiva y características individuales pueden modificar los resultados. Por esta razón, la aplicación de protocolos estandarizados sin considerar las condiciones de los animales puede limitar la eficiencia. Los problemas relacionados con la fertilidad de las vacas lecheras de elevada producción constituyen uno de los principales desafíos identificados dentro de la revisión. Lucy (2019) destacó las pérdidas reproductivas presentes dentro de estos sistemas y planteó interrogantes relacionadas con las consecuencias del incremento continuo de la productividad. Lucy (2019) también identificaron diferentes causas relacionadas con la baja fertilidad de las vacas altamente productoras. Los cambios metabólicos, balance energético, condiciones uterinas y calidad de los ovocitos pueden modificar considerablemente la eficiencia reproductiva. Estos resultados evidencian posibles relaciones entre los objetivos históricos de selección y determinados problemas reproductivos. La selección orientada principalmente hacia el incremento de la producción puede generar respuestas correlacionadas sobre otros caracteres.

Esta situación fortalece la necesidad de establecer objetivos de mejoramiento equilibrados. La eficiencia genética no debe interpretarse exclusivamente mediante el incremento de determinados indicadores productivos. La fertilidad, longevidad, salud y capacidad de adaptación constituyen componentes fundamentales para mantener sistemas sostenibles. El semen sexado presenta importantes posibilidades para orientar la composición de la descendencia. Kumar et al. (2024) analizaron su utilización dentro de los sistemas lecheros y destacaron las posibilidades para incrementar la disponibilidad de hembras de reemplazo. Esta tecnología permite establecer programas reproductivos más específicos. Las hembras de elevado mérito genético pueden inseminarse con semen destinado a incrementar la producción de descendencia femenina. Simultáneamente, los animales con menor valor genético pueden utilizarse dentro de otros programas de cruzamiento. Esta diferenciación presenta posibilidades para mejorar la eficiencia económica y genética. Kumar et al. (2024) analizaron los avances y perspectivas relacionadas con el sexado espermático. Aunque la tecnología ha experimentado importantes mejoras, persisten desafíos relacionados con fertilidad, costos y eficiencia de los procedimientos.

La selección adecuada de las hembras constituye un componente fundamental para mejorar los resultados. Los animales con condiciones reproductivas favorables pueden presentar mayores posibilidades de obtener gestaciones. La transferencia de embriones representa otra importante herramienta para incrementar el progreso genético. Bó et al. (2018) destacaron la evolución histórica de esta tecnología y sus posibilidades futuras. La principal contribución se encuentra relacionada con el incremento de la descendencia producida por hembras superiores. Las limitaciones

naturales de la reproducción bovina restringen la contribución genética materna. La transferencia de embriones permite superar parcialmente esta limitación. La obtención de múltiples embriones y utilización de hembras receptoras incrementa el número de descendientes producidos por las donantes. Este procedimiento aumenta la intensidad de selección de las hembras. Los programas tradicionales presentaban mayores posibilidades para utilizar intensivamente los machos mediante inseminación artificial.

Las tecnologías embrionarias contribuyeron a incrementar las posibilidades para aprovechar el mérito genético femenino. Sin embargo, la eficiencia presenta variabilidad. Las respuestas frente a los procedimientos de estimulación ovárica pueden diferir considerablemente entre animales. La cantidad y calidad de los embriones obtenidos también presentan diferencias. Esta variabilidad constituye uno de los principales desafíos para incrementar la eficiencia de los programas. La producción de embriones in vitro amplió considerablemente las posibilidades de las tecnologías embrionarias. Ferré et al. (2020) analizaron la producción a gran escala y las tasas de gestación obtenidas mediante estos procedimientos. La recuperación de ovocitos permite utilizar repetidamente hembras seleccionadas. Posteriormente, los procedimientos de maduración, fecundación y cultivo permiten producir embriones bajo condiciones de laboratorio.

Esta tecnología presenta importantes posibilidades para incrementar la velocidad de multiplicación genética. Krisher y Herrick (2024) mostraron la creciente importancia de la producción in vitro dentro de los programas reproductivos. La expansión de estos procedimientos evidencia su utilidad para los sistemas de mejoramiento. Sin embargo, la eficiencia depende de múltiples etapas. La calidad de los ovocitos, condiciones de cultivo, competencia de los embriones y manejo de las receptoras pueden modificar los resultados. La estandarización de los procedimientos y capacitación del personal representan componentes fundamentales. La selección genómica constituye uno de los principales avances contemporáneos identificados mediante la revisión. Doublet et al. (2019) analizaron las relaciones existentes entre selección genómica y tecnologías reproductivas.

La disponibilidad de información genómica permite identificar animales con elevado mérito genético a edades tempranas. Esta característica modifica considerablemente los procedimientos tradicionales de selección. Los programas convencionales dependían ampliamente de la evaluación fenotípica y pruebas de descendencia. Estos procedimientos requerían periodos prolongados antes de identificar adecuadamente los animales superiores. La selección genómica permite disminuir este tiempo y reducir el intervalo generacional. Esta característica puede incrementar considerablemente la velocidad del progreso genético. Sin embargo, la información genómica presenta mayores posibilidades cuando se combina con tecnologías capaces de multiplicar los animales seleccionados. Oliveira et al. (2023) destacó las relaciones existentes entre tecnologías embrionarias y selección genómica. La integración de estas herramientas constituye una de las principales estrategias para acelerar el mejoramiento bovino.

Los animales pueden evaluarse genómicamente a edades tempranas. (Ferré et al., 2020) Posteriormente, los individuos superiores pueden utilizarse dentro de programas de producción embrionaria. Esta combinación permite incrementar simultáneamente la precisión, intensidad de selección y velocidad del progreso. Sin embargo, la rápida multiplicación de un número limitado de individuos puede incrementar los riesgos relacionados con la disminución de la diversidad genética. La consanguinidad constituye uno de los principales desafíos de los programas intensivos de selección. La concentración del material genético puede generar consecuencias negativas sobre la salud y fertilidad. Por esta razón, los programas deben utilizar herramientas capaces de controlar las relaciones de parentesco y mantener niveles adecuados de variabilidad.

Bó et al. (2018) destacaron la importancia de las biotecnologías reproductivas dentro del mejoramiento genético. Sin embargo, las tecnologías constituyen herramientas que deben utilizarse dentro de programas correctamente planificados. La aplicación de procedimientos avanzados no garantiza automáticamente el progreso genético. Los resultados dependen de la selección adecuada de los animales. La multiplicación de individuos incorrectamente evaluados puede difundir características desfavorables dentro de las poblaciones. Por esta razón, los objetivos de selección deben establecerse antes de implementar las estrategias reproductivas. Doublet et al. (2019) mostraron que

la selección genómica puede acelerar la ganancia genética, aunque exige vigilar la diversidad poblacional. La evolución muestra una creciente integración entre diferentes herramientas.

La inseminación artificial amplió la utilización de machos superiores. La transferencia embrionaria incrementó la contribución de las hembras. La producción in vitro aumentó la capacidad de multiplicación. El semen sexado permitió orientar la composición de la descendencia. La selección genómica incrementó la precisión y velocidad de las decisiones. La combinación de estas tecnologías representa una transformación fundamental dentro de los programas contemporáneos. Fontes y Oosthuizen (2022) también destacaron los progresos relacionados con la gestión reproductiva y sus contribuciones al mejoramiento genético.

La organización de los procedimientos constituye un componente necesario para alcanzar resultados adecuados. La eficiencia depende de la capacidad para seleccionar las tecnologías según las características y objetivos de los sistemas. Crites et al. (2018) evaluaron la aplicación de semen sexado en programas de inseminación a tiempo fijo. La diversidad de herramientas proporciona posibilidades para desarrollar programas adaptados a diferentes contextos. Sin embargo, las tecnologías avanzadas pueden presentar importantes requerimientos económicos y técnicos.

Los costos constituyeron una de las principales limitaciones identificadas mediante la revisión. (Ferré et al., 2020) La inseminación artificial presenta mayores posibilidades de utilización generalizada debido a su desarrollo y disponibilidad. En contraste, la producción embrionaria y selección genómica pueden requerir mayores inversiones. La infraestructura constituye otro factor relevante. Los laboratorios, equipos y procedimientos especializados pueden limitar la aplicación dentro de determinados sistemas. La capacitación del personal también presenta una elevada importancia.

Los procedimientos reproductivos requieren conocimientos específicos. Los errores técnicos pueden disminuir la eficiencia y generar pérdidas económicas. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer la formación y especialización de los profesionales. Newton et al. (2018) destacaron las relaciones entre tecnologías reproductivas y mejoramiento genético. Los resultados de la presente revisión coinciden con la necesidad de integrar ambos componentes. La biotecnología proporciona herramientas para multiplicar los animales, mientras que la genética establece los criterios para seleccionar los individuos.

La separación de estos componentes puede disminuir la efectividad de los programas. Krisher y Herrick (2024) analizaron las biotecnologías desde perspectivas biológicas, técnicas y genéticas. Esta integración resulta necesaria para comprender las posibilidades y limitaciones. Los factores biológicos determinan la capacidad de respuesta de los animales. Los procedimientos técnicos modifican la eficiencia de las tecnologías.

Los componentes genéticos determinan las consecuencias sobre las poblaciones. La sostenibilidad representa otra dimensión fundamental. Lassen y Difford (2020) destacó los desafíos futuros de la producción pecuaria. El crecimiento de la demanda y las limitaciones ambientales requieren sistemas capaces de incrementar la eficiencia. El mejoramiento genético puede contribuir a desarrollar animales con características favorables.

Sin embargo, la selección debe considerar las condiciones ambientales y productivas. (Bó et al., 2018) Las interacciones entre genética y ambiente pueden modificar considerablemente el desempeño. Un animal genéticamente superior dentro de determinadas condiciones puede no presentar los mismos resultados en otros sistemas. Por esta razón, los programas deben considerar la adaptación. La eficiencia genética debe comprenderse mediante una perspectiva multidimensional.

El progreso por generación constituye un indicador relevante, pero no representa el único componente. La fertilidad, longevidad, salud, adaptación y diversidad genética también deben considerarse. Los resultados de la revisión evidencian que las tecnologías presentan mayores posibilidades cuando se integran dentro de programas equilibrados. Krisher y Herrick (2024) destacó diferentes perspectivas futuras relacionadas con las biotecnologías reproductivas. La integración entre reproducción, genómica y herramientas moleculares probablemente continuará incrementándose. Los avances pueden mejorar la eficiencia de los procedimientos y ampliar las posibilidades de selección. (Newton et al., 2018) Sin embargo, estas innovaciones también pueden generar nuevos desafíos. El acceso desigual a las tecnologías puede incrementar las diferencias entre sistemas productivos. La concentración del material genético

puede aumentar los riesgos relacionados con la diversidad. Los requerimientos técnicos pueden limitar la aplicación dentro de sistemas pequeños.

Por esta razón, el desarrollo tecnológico debe acompañarse de estrategias destinadas a garantizar su utilización adecuada. (Newton et al., 2018) La presente revisión sistemática presenta algunas limitaciones. El corpus documental estuvo constituido por 20 fuentes seleccionadas para el estudio y no representa necesariamente la totalidad de la evidencia científica disponible. Las publicaciones presentaron heterogeneidad en sus objetivos, diseños y variables analizadas. Esta característica limitó las posibilidades para realizar comparaciones cuantitativas y desarrollar un metaanálisis. Sin embargo, la diversidad de fuentes permitió analizar la evolución y aplicaciones de las principales tecnologías reproductivas.

La amplitud temporal proporcionó una perspectiva sobre los cambios producidos durante diferentes periodos. (Kumar et al., 2024) En conjunto, la evidencia muestra que las biotecnologías reproductivas han contribuido considerablemente al mejoramiento genético bovino. La inseminación artificial, sincronización, semen sexado, transferencia embrionaria, producción in vitro y selección genómica presentan diferentes aplicaciones y beneficios. La integración entre estas herramientas constituye una de las principales tendencias contemporáneas. Sin embargo, la eficiencia depende de la selección adecuada de los animales, condiciones reproductivas, capacidad técnica y planificación.

Los programas deben establecer objetivos equilibrados y controlar los riesgos relacionados con la disminución de la diversidad genética. (Doublet et al., 2019) Finalmente, las biotecnologías reproductivas deben considerarse herramientas estratégicas dentro de programas integrales de mejoramiento. Su aplicación planificada puede incrementar la intensidad y precisión de la selección, disminuir el intervalo generacional y acelerar la difusión del progreso genético. No obstante, los beneficios sostenibles requieren integrar eficiencia reproductiva, adaptación, diversidad genética, viabilidad económica y condiciones productivas.

5. CONCLUSIÓN

La revisión sistemática confirmó que las biotecnologías reproductivas han transformado el mejoramiento genético bovino al ampliar la capacidad de seleccionar, multiplicar y difundir animales de mérito superior. La inseminación artificial incrementó principalmente la contribución genética de los machos, mientras que la transferencia de embriones y la producción in vitro permitieron aprovechar con mayor intensidad el potencial de las hembras. En conjunto, estas herramientas reducen las restricciones biológicas de la reproducción natural y favorecen una organización más eficiente de los programas de selección.

La sincronización del estro y de la ovulación fortaleció la programación de la inseminación y de los procedimientos embrionarios, aunque su eficacia continuó condicionada por el estado fisiológico, sanitario y nutricional de los animales. El semen sexado aportó la posibilidad de orientar la composición de la descendencia y mejorar la planificación de los reemplazos; sin embargo, las diferencias de fertilidad, el costo de las dosis y la variabilidad entre reproductores exigen seleccionar cuidadosamente a las hembras y ajustar la estrategia a los objetivos productivos.

Las tecnologías embrionarias presentaron una elevada capacidad para acelerar la multiplicación de hembras superiores. La aspiración folicular, la producción in vitro y la transferencia embrionaria permiten generar mayor cantidad de descendientes y aplicar esquemas intensivos de selección. No obstante, el rendimiento depende de la calidad de los ovocitos y embriones, la respuesta de las donantes, las condiciones de cultivo, el manejo de las receptoras y la competencia técnica del personal, por lo que la disponibilidad de infraestructura no garantiza por sí sola resultados satisfactorios.

La selección genómica constituyó el componente con mayores posibilidades para disminuir el intervalo generacional y aumentar la precisión de las decisiones. Su integración con semen sexado y tecnologías embrionarias permite identificar animales superiores a edades tempranas y multiplicarlos con rapidez. Esta aceleración también incrementa el riesgo de concentrar el material genético en un número reducido de individuos, por lo que los programas deben controlar la consanguinidad, conservar la variabilidad y evitar que el progreso productivo comprometa la fertilidad, salud, longevidad o adaptación.

Las principales limitaciones fueron los costos, la necesidad de infraestructura especializada, la capacitación insuficiente, la variabilidad de las respuestas biológicas y el acceso desigual a las tecnologías. Por ello, la elección de cada biotecnología debe responder al tamaño, recursos, condiciones ambientales y objetivos del sistema productivo. La evaluación de eficiencia necesita integrar resultados reproductivos, progreso genético, viabilidad económica, bienestar animal, adaptación y sostenibilidad, en lugar de depender exclusivamente de indicadores de productividad. Se concluye que las biotecnologías reproductivas mejoran la eficiencia genética bovina cuando forman parte de programas de selección planificados y técnicamente supervisados. Su aporte no reside únicamente en acelerar la reproducción, sino en conectar información genómica, mérito funcional, manejo reproductivo y objetivos productivos. El desarrollo futuro deberá fortalecer la integración entre reproducción, genómica y herramientas moleculares, ampliar la accesibilidad tecnológica y mantener mecanismos de vigilancia de la diversidad genética para construir poblaciones bovinas productivas, fértiles, adaptadas y sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berry, D. P., & Murphy, T. B. (2025). Relative effectiveness in genetic gain from genomic selection of candidate dams versus genomic selection of their progeny. *JDS Communications*, 6(3), 345–349. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2024-0705>
- Bó, G. A., Huguenine, E., de la Mata, J. J., Núñez-Olivera, R., Baruselli, P. S., & Menchaca, A. (2018). Programs for fixed-time artificial insemination in South American beef cattle. *Animal Reproduction*, 15(Suppl. 1), 952–962. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2018-0025>
- Clasen, J. B., Lehmann, J. O., Thomasen, J. R., Østergaard, S., & Kargo, M. (2019). Combining extended lactation with sexed semen in a dairy cattle herd: Effect on genetic and total economic return. *Livestock Science*, 223, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.03.001>
- Crites, B. R., Vishwanath, R., Arnett, A. M., Bridges, P. J., Burris, W. R., McLeod, K. R., & Anderson, L. H. (2018). Conception risk of beef cattle after fixed-time artificial insemination using either SexedUltra 4M sex-sorted semen or conventional semen. *Theriogenology*, 118, 126–129. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.05.003>
- Diskin, M. G. (2018). Review: Semen handling, time of insemination and insemination technique in cattle. *Animal*, 12(S1), s75–s84. <https://doi.org/10.1017/S1751731118000952>
- Doublet, A.-C., Croiseau, P., Fritz, S., Michenet, A., Hozé, C., Danchin-Burge, C., Laloë, D., & Restoux, G. (2019). The impact of genomic selection on genetic diversity and genetic gain in three French dairy cattle breeds. *Genetics Selection Evolution*, 51, Article 52. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0495-1>
- Ferré, L. B., Kjelland, M. E., Strøbech, L. B., Hyttel, P., Mermillod, P., & Ross, P. J. (2020). Review: Recent advances in bovine in vitro embryo production: Reproductive biotechnology history and methods. *Animal*, 14(5), 991–1004. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002775>
- Fontes, P. L. P., & Oosthuizen, N. (2022). Applied use of Doppler ultrasonography in bovine reproduction. *Frontiers in Animal Science*, 3, Article 912854. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.912854>
- Krisher, R. L., & Herrick, J. R. (2024). Bovine embryo production in vitro: Evolution of culture media and commercial perspectives. *Animal Reproduction*, 21(3), Article e20240051. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2024-0051>
- Kumar, S., Magotra, A., Kumar, M., Dalal, D. S., & Kumari, S. (2024). Semen sexing and its impact on fertility and genetic gain in cattle. *Zygote*, 32(2), 109–118. <https://doi.org/10.1017/S0967199424000066>
- Lassen, J., & Difford, G. F. (2020). Review: Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle. *Animal*, 14(S3), s473–s483. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001561>

- Lozada-Soto, E. A., Maltecca, C., Lu, D., Miller, S., Cole, J. B., & Tiezzi, F. (2021). Trends in genetic diversity and the effect of inbreeding in American Angus cattle under genomic selection. *Genetics Selection Evolution*, 53, Article 50. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00644-z>
- Lucy, M. C. (2019). Symposium review: Selection for fertility in the modern dairy cow—Current status and future direction for genetic selection. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 3706–3721. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15544>
- Newton, J. E., Hayes, B. J., & Pryce, J. E. (2018). The cost-benefit of genomic testing of heifers and using sexed semen in pasture-based dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 6159–6173. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13476>
- Oliveira, C. S., Camargo, L. S. A., Silva, M. V. G. B. da, Saraiva, N. Z., Quintão, C. C. R., & Machado, M. A. (2023). Embryo biopsies for genomic selection in tropical dairy cattle. *Animal Reproduction*, 20(2), Article e20230064. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-AR2023-0064>
- 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., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Seidel, G. E., Jr., & DeJarnette, J. M. (2022). Applications and world-wide use of sexed semen in cattle. *Animal Reproduction Science*, 246, Article 106841. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2021.106841>
- Shivaani, M., & Madan, P. (2024). Application of imaging and spectroscopy techniques for grading of bovine embryos: A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, Article 1364570. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1364570>
- Speckhart, S. L., Wooldridge, L. K., & Ealy, A. D. (2023). An updated protocol for in vitro bovine embryo production. *STAR Protocols*, 4(1), Article 101924. <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2022.101924>
- Velazquez, M. A. (2023). Nutritional strategies to promote bovine oocyte quality for in vitro embryo production: Do they really work? *Veterinary Sciences*, 10(10), Article 604. <https://doi.org/10.3390/vetsci10100604>

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

Nombres de autores e iniciales:

José Luis Zúñiga Pincay (JLZP)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (JLZP)

Curación de datos: (JLZP)

Análisis formal: (JLZP)

Adquisición de fondos: (JLZP)

Investigación: (JLZP)

Metodología: (JLZP)

Administración del proyecto: (JLZP)

Recursos: No aplica

Software: (JLZP)

Supervisión: (JLZP)

Validación: (JLZP)

Visualización: (JLZP)

Redacción – Borrador original: (JLZP)

Redacción – Revisión y edición: (JLZP)