

Rehabilitación con RV para mitigar las externalidades negativas de las lesiones del LCA en el fútbol profesional

Virtual Reality–Based Rehabilitation to Mitigate the Negative Externalities of ACL Injuries in Professional Football

Título corto: Rehabilitación con RV en lesiones de lca

Daniel Megía Cayuela (<https://orcid.org/0000-0002-7965-3164>)¹

¹ Universidad de Málaga, Málaga, España.

Autor de correspondencia:

E-mail del autor: danimegia@uma.es

DECLARACIONES

Conflictos de interés:

Nada a Declarar

Financiación:

Nada a Declarar

Declaración de contribuciones de autoría CRediT:

INFORMACIÓN EDITORIAL

Recibido: 11/02/2026

Aceptado: 28/09/2026

RESUMEN

Las lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) representan una de las principales fuentes de externalidades negativas en el fútbol profesional, debido a su elevado impacto económico, sanitario y deportivo. Más allá del perjuicio individual del jugador lesionado, estas lesiones generan costes indirectos significativos para los clubes, derivados del salario improductivo, la pérdida de rendimiento competitivo y el aumento del gasto sanitario institucional, que pueden superar los 250.000 € por jugador. El tratamiento fisioterapéutico tradicional, aunque clínicamente eficaz, conlleva largos periodos de rehabilitación y riesgo de recaídas. En contraste, la integración de la realidad virtual (RV) en los programas de rehabilitación permite una recuperación más rápida, mayor adherencia terapéutica y optimización del control neuromuscular, reduciendo el tiempo de baja en aproximadamente un 15%. Desde una perspectiva económica, la inversión inicial en tecnología RV (15.000–30.000 €) presenta un retorno superior al 2.000%, al disminuir costes médicos y salariales asociados a la inactividad deportiva. Este estudio analiza el papel de la RV como herramienta innovadora para mitigar las externalidades negativas del LCA, destacando su potencial para mejorar la eficiencia económica y sanitaria en los clubes de fútbol profesional.

PALABRAS CLAVE: Lesiones LCA, Recuperación LCA, Gafas RV, Ineficiencia económica, Inversión tecnológica

ABSTRACT

Anterior cruciate ligament (ACL) injuries represent one of the main sources of negative externalities in professional football due to their substantial economic, medical, and sporting impact. Beyond the individual harm suffered by the injured player, these injuries generate high indirect costs for clubs, arising from unproductive salaries, loss of competitive performance, and increased institutional healthcare expenditure, which may exceed €250,000 per player. Although conventional physiotherapy-based treatment is clinically effective, it involves long rehabilitation periods and a non-negligible risk of reinjury. In contrast, the integration of virtual reality (VR) into rehabilitation programs enables faster recovery, greater therapeutic adherence, and improved neuromuscular control, reducing time to return to play by approximately 15%. From an economic perspective, the initial investment in VR technology (€15,000–30,000) yields a return exceeding 2,000% by lowering both medical and salary-related costs associated with sports inactivity. This study examines the role of VR as an innovative tool to mitigate the negative externalities of ACL injuries, highlighting its potential to improve both economic and healthcare efficiency in professional football clubs.

KEYWORDS: ACL injuries, ACL recovery, VR headsets, Economic inefficiency, Technological investment

INTRODUCCIÓN

Las lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) son una de las patologías más graves y comunes entre los deportistas de élite, particularmente en disciplinas como fútbol, baloncesto, balonmano y esquí. Estas lesiones no solo implican una interrupción prolongada de la actividad competitiva, sino que también pueden tener consecuencias a largo plazo sobre la salud articular y el rendimiento deportivo (Griffin et al., 2006). Si hablamos de anatomía y función del LCA podemos afirmar que nos encontramos ante uno de los principales estabilizadores de la rodilla, cuya función es prevenir el desplazamiento anterior de la tibia respecto al fémur y controlar la rotación interna (Solomon et al., 2022). La integridad del LCA es esencial para mantener la estabilidad funcional de la rodilla, especialmente en actividades que implican cambios rápidos de dirección, saltos o desaceleraciones, comunes en el deporte profesional. La incidencia de lesiones del LCA en atletas profesionales varía entre 0.06 y 3.7 por cada 1.000 horas de exposición al deporte, dependiendo de la disciplina (Gabbett, 2016). En deportes como el fútbol, las lesiones de LCA representan hasta el 20-25% de todas las lesiones graves (Waldén et al., 2016). Estas lesiones ocurren principalmente sin contacto directo, siendo más frecuentes en maniobras de corte, aterrizajes mal ejecutados y desaceleraciones (Hewett et al., 2005). Diversos estudios han identificado factores de riesgo como desequilibrios neuromusculares, laxitud ligamentaria, deficiencias propioceptivas, fatiga muscular y factores anatómicos (como el ángulo Q aumentado en mujeres) (Myer et al., 2008).

Los factores de riesgo de lesión del LCA en atletas profesionales se han estudiado ampliamente debido a su alta incidencia, impacto en el rendimiento y riesgo de reincidencia. La etiología es multifactorial, lo que significa que no existe una única causa; más bien, una combinación de variables anatómicas, biomecánicas, neuromusculares, hormonales, ambientales, psicológicas y preventivas aumenta la probabilidad de lesión. Destacable en las mujeres, se ha planteado la hipótesis de que las fluctuaciones hormonales durante el ciclo menstrual influyen en la laxitud ligamentosa y el control neuromuscular, aumentando el riesgo de lesión del LCA, especialmente durante la fase ovulatoria (Wojtyś et al., 2002). Las influencias hormonales se han estudiado ampliamente como una posible explicación de la mayor tasa de lesiones del LCA en mujeres en comparación con los hombres.

La prevención de lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) ha sido objeto de múltiples programas de intervención, especialmente en deportes de equipo. Programas como FIFA 11+, Prevent Injury and Enhance Performance (PEP) y Knee Control han demostrado reducciones de entre el 50 % y el 80 % en la incidencia de lesiones, especialmente entre atletas jóvenes y mujeres (Silvers-Granelli et al., 2015). Estos programas incluyen ejercicios pliométricos, fortalecimiento de la cadena posterior, control del core y entrenamiento propioceptivo. La evidencia sugiere que la implementación sistemática y supervisada de estos programas en entornos profesionales podría contribuir significativamente a reducir la carga general de lesiones del LCA (Thorborg et al., 2017).

La realidad virtual (RV) mediante gafas 3D permite la simulación de escenarios funcionales en un entorno seguro, facilitando la reeducación del movimiento y el fortalecimiento del control neuromuscular. Este tipo de retroalimentación visual mejora la activación muscular y reduce los patrones compensatorios durante la rehabilitación. La naturaleza inmersiva e interactiva de las gafas 3D aumenta la motivación del paciente, especialmente durante las fases intermedia y avanzada del tratamiento. Esto se traduce en una mayor adherencia y una menor tasa de abandono del programa de rehabilitación. Además, la retroalimentación en tiempo real y el entrenamiento funcional a través de las gafas 3D proporcionan información visual inmediata

durante el ejercicio, crucial para corregir la técnica, especialmente en tareas que implican saltos, agilidad y cambios de dirección. Esto facilita el cumplimiento de criterios objetivos para la toma de decisiones sobre la reincorporación deportiva.



Figura 1. Diseño de programas en RV con gafas 3D.

Fuente: Rehabike VR y Gokeler.

Asimismo también permite la evaluación objetiva del rendimiento, ya que algunos sistemas de RV integran sensores y software que cuantifican el rendimiento funcional (velocidad, tiempo de reacción, precisión), facilitando un seguimiento individualizado y una evaluación del progreso del paciente basada en datos. Por lo tanto, la RV contribuye positivamente a la recuperación psicológica. El uso de la realidad virtual también ayuda a reducir la ansiedad y el miedo al movimiento (kinesiofobia), ayudando a la exposición progresiva en contextos similares a los escenarios reales de competición, lo que resulta esencial para prevenir recaídas. Las fases de rehabilitación y recuperación tras una lesión del LCA siguen un enfoque por fases, adaptado individualmente. Comienza con la Fase 1, considerada la fase postoperatoria aguda (0-2 semanas), donde los síntomas se relacionan con el control del dolor y el edema, la recuperación del rango de movimiento y la activación del cuádriceps. Durante esta fase, no se recomienda el uso de gafas 3D, ya que el objetivo es reducir la inflamación y el dolor. En la Fase 2, denominada rehabilitación temprana (2-6 semanas), que consiste en ejercicios de carga progresiva, se considera óptimo comenzar a usar las gafas con programas adaptados a estos ejercicios, donde se mejora el control neuromuscular y el uso de la bicicleta estática con ejercicios en piscina. En la Fase 3, la fase de rehabilitación intermedia (6-12 semanas), la RV ayudará al paciente a fortalecer las extremidades inferiores, progresando a ejercicios funcionales y trabajo propioceptivo intensivo. La última fase de recuperación, la Fase 4, considerada rehabilitación avanzada (3-6 meses), incluye la simulación de movimientos deportivos, entrenamiento pliométrico y de agilidad, y control de asimetrías funcionales. El proceso de estas fases previas permitirá pasar a la Fase 5, fase de vuelta al deporte (6-12 meses),

donde se realizará una evaluación funcional completa en función de los criterios de vuelta al deporte: fuerza, estabilidad, confianza psicológica.

Actualmente, existe una gama de programas y plataformas de RV para la rehabilitación del ligamento cruzado anterior (LCA) con ciclismo estacionario y control neuromuscular. El objetivo es mejorar la propiocepción, el control motor y la biomecánica. Su aplicación se ha utilizado en la rehabilitación del LCA para la reeducación neuromuscular gestionada por profesionales en centros clínicos. Estudios avalan el uso de la RV en la rehabilitación del LCA, como el de Gokeler et al. (2020), que desarrollaron la mejora del control neuromuscular y la percepción del riesgo con RV en pacientes con LCA, Johnston et al. (2019), respecto a los beneficios de la realidad virtual en la readaptación física post-LCA, y Louw et al. (2022), avalando la integración del ciclismo estacionario con RV para la readaptación deportiva.

La evidencia científica todavía no es concluyente, a pesar del creciente interés por la realidad virtual (RV) como herramienta complementaria en la rehabilitación del LCA, al presentar resultados heterogéneos. Mientras diversas revisiones sistemáticas y ensayos clínicos informan mejoras significativas en variables como la propiocepción, el equilibrio dinámico o el tiempo de retorno al deporte, otros estudios encuentran beneficios limitados cuando la RV se compara con protocolos convencionales bien estructurados, especialmente en pacientes con elevada adherencia al tratamiento fisioterapéutico tradicional. Asimismo, la considerable variabilidad en las plataformas utilizadas, la duración de las intervenciones, los indicadores funcionales evaluados y el reducido tamaño muestral de numerosos ensayos dificulta la obtención de conclusiones definitivas sobre la magnitud real del efecto clínico de la RV. En consecuencia, aunque existe un consenso creciente acerca del potencial terapéutico de la RV, todavía persisten incertidumbres sobre su efectividad clínica global y, especialmente, sobre su impacto económico en el deporte profesional.

Naturalmente, este tipo de lesiones provoca externalidades negativas desde el punto de visto económico, de rendimiento deportivo y de carácter social en los deportistas de élite, especialmente los futbolistas que son el colectivo mejor remunerado. Podemos destacar el trabajo de Secrist et al. (2016) cuyo estudio compara jugadores de la NFL lesionados por ACL entre 2010–2013. Concluye que, en promedio, los jugadores con lesión de LCA ganaron unos 2 millones de dólares menos en los 4 años siguientes al evento, demostrando la fuerte externalidad económica a nivel individual (pérdida de salario) y por extensión implicaciones para contratos/aseguradoras. De igual forma, destaca el trabajo de Turnbull et al. (2023) con

los costes de las lesiones deportivas, los cuales sintetizan los costes directos e indirectos derivados de las lesiones de LCA, como los gastos sanitarios, bajas laborales y pérdida en el rendimiento deportivo. En cuanto, a los costes derivados en la reincorporación de los jugadores destaca el trabajo de Forsythe et al. (2021), donde realiza una estimación del tiempo de vuelta tras lesión LCA en 216 días de media y las consecuencias en la disminución de minutos jugados en las 2 siguientes temporadas con la consiguiente devaluación en el mercado de transferencias. En la misma línea, se encuentra el trabajo de Mazza et al. (2022) donde los jugadores europeos tras lesión LCA arrastran una reducción en el rendimiento deportivo con su correspondiente externalidad económica, social y deportiva.

La literatura previa determina que tras una lesión LCA, las externalidades son evidentes. En primer lugar la pérdida de ingresos personales y carreras truncadas de jugadores profesionales conllevan perder millones en ingresos tras una LCA y abandonar más frecuentemente la élite (externalidad individual y laboral). También suponen costes sanitarios y societales donde los costes por lesión son muy altos (decenas de miles por caso) y el potencial ahorro significativo mediante programas de prevención (ROI positivo) merece consideración. También la pérdida de rendimiento por menor disponibilidad provoca que muchos jugadores cuando vuelven a competir, tengan una reducción de minutos y rendimiento durante 1–2 temporadas, lo que repercute en resultados del club, valor de mercado, ingresos por competiciones y seguros. Por último, los derivados de los costes por ineficiencias del sistema, como son retrasos en diagnóstico y predicciones inadecuadas que aumentan los costes directos y uso de recursos ineficientes.

El objetivo de este artículo es proponer un tratamiento eficaz en las fases de recuperación con aplicación de nuevas tecnologías adaptadas al campo de la medicina, con la finalidad de reducir las externalidades negativas derivadas del impacto económico que supone el coste sanitario, el coste de oportunidad deportivo, el gasto salarial y la pérdida de forma física del deportista durante la fase de recuperación hasta la incorporación total a la actividad. Para ello, se ha considerado como muy beneficioso la aplicación de Gafas 3D en la Recuperación de Lesiones del Ligamento Cruzado Anterior (LCA), a partir del desarrollo de programas de realidad virtual (RV). De estudios previos, se ha concluido que su uso permite mejorar el control neuromuscular y propiocepción.

Esto facilita el cumplimiento de criterios objetivos para el retorno al deporte. Cortés-Perez et al (2025) realiza una revisión sistemática y metaanálisis que evalúa VR-based therapy (VRBT)

como complemento en la rehabilitación tras lesión/ACLR. Concluye que la VRBT reduce el dolor, mejora la función de rodilla, fuerza, propiocepción y equilibrio dinámico respecto a la rehabilitación convencional en varios estudios incluidos. Los autores recomiendan considerar VR como complemento en protocolos post-operatorios. Otro ensayo clínico aleatorizado realizado por Gsangaya et al. (2023) comparó rehabilitación post-ACLR con y sin VR inmersiva (ej. PlayStation-VR u otra plataforma). Encontró mejoras significativas en reducción del dolor y algunas medidas funcionales en el grupo VR; sugiere que la VR inmersiva es un adjunto efectivo en las primeras fases de la rehabilitación. El estudio clínico/controlado de Shi (2020) mostró que el entrenamiento de equilibrio con VR mejoró la propiocepción y recuperación funcional tras ACLR comparado con rehabilitación rutinaria. A pesar de limitaciones en tamaño muestral, aporta evidencia temprana del efecto sobre propiocepción.

Las lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) son una de las afecciones más graves en el fútbol, tanto profesional como amateur. Estas lesiones implican un largo proceso de recuperación, afectan significativamente la carrera deportiva y tienen alta prevalencia en ambos sexos, aunque con diferencias notables entre hombres y mujeres. De los datos recogidos, se puede concluir que la incidencia promedio en fútbol profesional en Hombres es del 0.06 – 0.09 lesiones por 1000 horas de exposición y en las Mujeres de 0.09 – 0.12 lesiones por 1000 horas de exposición. Interpretando estos datos en el fútbol profesional, si tenemos en cuenta que un futbolista dedica unas 50 horas mensuales (entrenamientos y partidos) y que existen 400 jugadores profesionales entre 1ª y 2ª división, los datos manifiestan en el caso de los hombres que existen entre 12 a 18 lesiones por temporada entre las dos categorías, afectando entre el 3%-4,5% del total de los jugadores tienen este tipo de lesión. Mientras que en mujeres afecta entre 18 y 24 lesiones por temporada, afectando entre 6%-9.5% del total de jugadores. En definitiva, según estudios previos estos datos corroboran el estudio antes mencionado de Renstrom et al. (2008), donde afirmaban que las mujeres futbolistas tienen entre 2 y 8 veces mayor riesgo de lesión de LCA que los hombres.

Naturalmente, el proceso de lesiones deportivas en el mundo profesional provoca externalidades negativas con su correspondiente impacto económico. Durante la recuperación del futbolista, el tiempo medio de retorno funcional prolongado es de unos 9 meses en rehabilitación convencional Gokeler et al., 2016), siendo el coste de fisioterapia, seguimiento médico y revisiones estimado entre 8.000€–12.000€ por paciente con la consiguiente pérdida de disponibilidad del jugador, coste de sustitución o fichaje temporal; reducción de rendimiento

deportivo. El retraso en retorno a la competición con un promedio de 11.2 meses vs los 9.6 con RV (Grooms & Myer, 2019) siendo el coste salarial improductivo ($\approx 100.000\text{€} - 300.000\text{€/mes}$ para jugadores de élite) y pérdida de puntos clasificatorios. Según los expertos el tratamiento de factores psicológicos y kinesiofobia, alta persistencia del al reingreso, mejora la aplicación del tratamiento de RV de un 22% a un 48%, según los estudios de Cupal & Brewer (2001) y mejora la confianza del jugador, evitando la caída del valor de mercado y rendimiento competitivo. En el aspecto de la recaídas y reintervenciones, el estudio de Lubetzky-Vilnai et al. (2020) confirman que con las gafas RV se mejora hasta en un 25% el índice de recaídas por este tipo de lesión. Además confirman según datos clínicos que con el tratamiento convencional la adherencia al tratamiento se establece en un 68% de los casos a diferencia de las gafas RV sube a un 91%, como reducción del tiempo de inicio de la carrera deportiva.

Las lesiones de LCA generan externalidades negativas relevantes, tanto para el sistema sanitario por la extensión de tratamientos y seguimiento multidisciplinar, como para los clubes profesionales, donde implican pérdida de capital humano, descenso del rendimiento competitivo y elevado coste de oportunidad. El uso de rehabilitación asistida con realidad virtual (RV) reduce estas externalidades al mejorar la adherencia, acortar el tiempo de retorno y optimizar la eficiencia funcional del deportista. El impacto económico y sanitario de las lesiones del LCA genera un elevado coste sanitario directo e indirecto, debido al tratamiento quirúrgico, la fisioterapia prolongada y el seguimiento médico postoperatorio. En futbolistas profesionales, los costes se amplifican por la inversión médica privada, seguimiento especializado y readaptación deportiva, estimándose un coste global entre 20.000€ y 30.000€ por jugador lesionado, según comparativas europeas (Ekstrand et al., 2019). Los programas de fisioterapia prolongada (6–9 meses) representan entre el 35% y el 45% del coste total del proceso (Mather et al., 2013). Como costes indirectos, se incluyen la pérdida de productividad laboral, el absentismo y los tratamientos psicológicos o de readaptación neuromuscular, que pueden elevar el coste total por paciente a más de 15.000€ (Filbay et al., 2017).

La externalidad sanitaria agregada, considerando una incidencia anual media de 50–60 lesiones de LCA en las dos principales divisiones del fútbol profesional español, el impacto total para el sistema sanitario y clubes puede superar los 1.000.000€ anuales, sin contabilizar el coste de oportunidad deportivo asociado a la baja de jugadores, según datos facilitados por LaLiga en su informe anual 2023/24.

METODOLOGÍA

El diseño del estudio adopta un diseño metodológico mixto que combina una revisión sistemática de la literatura con un modelo econométrico de evaluación económica. La revisión sistemática se desarrolló siguiendo las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el objetivo de identificar la evidencia científica disponible sobre la eficacia de la realidad virtual (RV) como complemento de la fisioterapia convencional en la rehabilitación tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA). Posteriormente, los resultados clínicos obtenidos de los estudios seleccionados fueron utilizados como parámetros de entrada para desarrollar un modelo de regresión ponderada (Weighted Least Squares, WLS), destinado a estimar el impacto económico de la incorporación de la RV en el proceso de recuperación de futbolistas profesionales.

Revisión sistemática de la literatura.

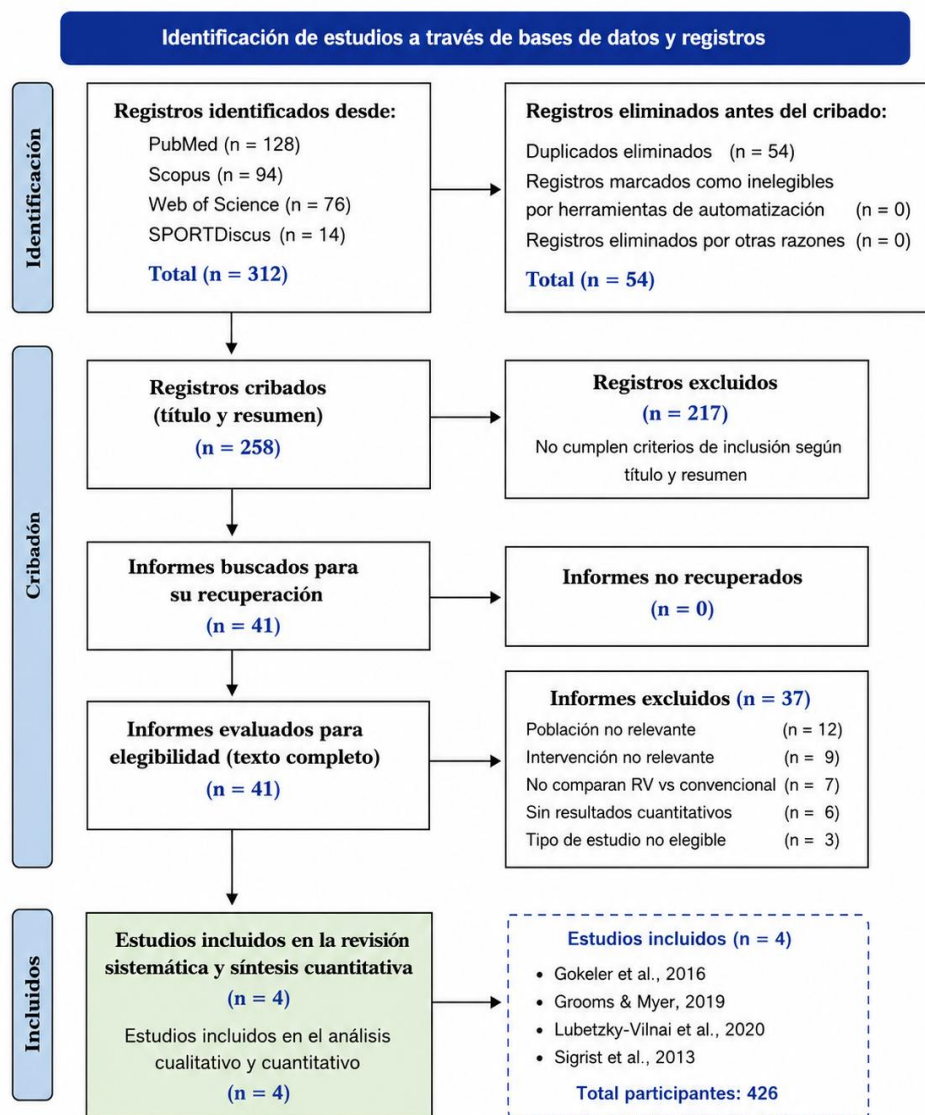
Las fuentes de información se realizó entre enero y marzo de 2026 en las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science y SPORTDiscus, seleccionadas por su amplia cobertura de literatura biomédica, deportiva y de ciencias de la salud, con una estrategia de búsqueda que combinó términos relacionados con la lesión del ligamento cruzado anterior, la realidad virtual y la rehabilitación deportiva mediante operadores booleanos. La ecuación principal utilizada fue: ("Anterior Cruciate Ligament" OR ACL) AND ("Virtual Reality" OR VR OR "Immersive Rehabilitation") AND (Rehabilitation OR Physiotherapy) AND (Soccer OR Football). La búsqueda se limitó a artículos publicados entre enero de 2010 y diciembre de 2025 en inglés o español. Las palabras clave utilizadas fueron: *Anterior Cruciate Ligament*, *ACL*, *Virtual Reality*, *VR*, *Rehabilitation*, *Physiotherapy*, *Football*, *Soccer*, *Sports Medicine* y *Cost-effectiveness*.

Los criterios de inclusión de aquellos estudios que cumplían simultáneamente los siguientes criterios se realizaron en base a ensayos clínicos aleatorizados o estudios comparativos, pacientes sometidos a reconstrucción del LCA, comparación entre fisioterapia convencional y programas de rehabilitación asistidos mediante realidad virtual, disponibilidad de resultados cuantitativos sobre recuperación funcional, retorno al deporte, adherencia terapéutica, propiocepción o variables relacionadas y publicaciones revisadas por pares.

Se excluyeron revisiones narrativas, editoriales, cartas al editor, protocolos de investigación, estudios sin grupo de comparación, publicaciones duplicadas, literatura gris y aquellos trabajos que no aportaban información cuantitativa suficiente para el análisis.

El proceso de identificación y selección de los artículos siguió las recomendaciones PRISMA 2020. Inicialmente se identificaron todos los registros obtenidos en las bases de datos seleccionadas. Tras eliminar los documentos duplicados, dos investigadores revisaron de forma independiente los títulos y resúmenes para comprobar su elegibilidad. Posteriormente se evaluaron los textos completos de los artículos potencialmente relevantes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos.

Finalmente, cuatro estudios cumplieron todos los requisitos metodológicos y fueron incorporados a la síntesis cuantitativa y al posterior desarrollo del modelo econométrico.



Fuente: Elaboración propia siguiendo la declaración PRISMA 2020.

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only.

Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de selección de estudios.

La calidad metodológica de los estudios incluidos fue evaluada mediante la herramienta Cochrane Risk of Bias 2 (RoB 2), analizando el proceso de aleatorización, las desviaciones de la intervención prevista, la existencia de datos incompletos, la medición de los resultados y la selección de los resultados comunicados. La evaluación fue realizada de forma independiente por los investigadores, resolviendo las discrepancias mediante consenso.

Respecto a la muestra analizada, la unidad de análisis de esta investigación no fueron pacientes reclutados directamente, sino estudios científicos previamente publicados. Tras el proceso de selección se incluyeron cuatro investigaciones que aportaron conjuntamente una muestra

agregada de 426 participantes sometidos a programas de rehabilitación tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior. Esta muestra agregada constituyó la base empírica utilizada para sintetizar la evidencia clínica disponible y desarrollar el modelo econométrico posterior. En consecuencia, el presente trabajo corresponde a un estudio secundario basado en evidencia previamente publicada y no a un ensayo clínico con reclutamiento propio de pacientes.

Modelo econométrico

Los resultados clínicos obtenidos mediante la revisión sistemática se incorporaron posteriormente a un modelo de regresión lineal ponderada (Weighted Least Squares, WLS), en el que cada estudio fue ponderado en función de su tamaño muestral. El objetivo del modelo fue estimar el efecto promedio de la realidad virtual sobre el tiempo de recuperación funcional y cuantificar su repercusión económica en términos de reducción de costes médicos, salariales y deportivos para los clubes profesionales.

La especificación econométrica utilizada fue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot RV_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde:

Y_i : tiempo de retorno (en meses) en el estudio i ,

β_1 : mide el efecto promedio de la RV sobre la variable dependiente.

RV_i : dummy (1 = fisioterapia + RV, 0 = convencional),

ε_i : término de error, Ponderado por n_i (tamaño muestral del estudio) para dar más peso a los estudios grandes.

Posteriormente se desarrolló un segundo modelo destinado a cuantificar el impacto económico derivado de la reducción del tiempo de recuperación, estimando el ahorro asociado a los costes salariales improductivos, los costes médicos y la pérdida de rendimiento deportivo.

El modelo empleado metodológico en esta investigación ha consistido en la recopilación de los ensayos clínicos de los autores Gokeler et al. (2016), Grooms & Myer (2019), Lubetzky-Vilnai

et al. (2020) y Sigrist et al., (2013). Sobre un total muestral de 426 análisis, según los resultados obtenidos ha permitido generar un modelo de carácter econométrico de tipología Regresión inter-estudio ponderada (WLS), donde a partir de un modelo lineal ponderado por el tamaño muestral dan respuesta al anticipo en el tiempo de recuperación de los pacientes con el tratamiento de RV, en comparación con la simple aplicación de la terapia convencional:

La estimación se consigue a partir de la siguiente formulación:

$$\beta_1 = \frac{\sum n_i(RV_i - RV)(Y_i - Y)}{\sum n_i(RV_i - RV)^2} \quad (2)$$

En el caso de que $\beta_1 < 0$ en el caso del tiempo de retorno funcional, indica una reducción significativa del tiempo con el uso de RV. Si $\beta_1 > 0$ en variables como simetría funcional o adherencia, indica una mejora significativa.

Las principales variables analizadas en relación al efecto del uso de las gafas de RV en pacientes en fase de recuperación de lesiones LCA fueron las siguientes:

- Tiempo medio de retorno funcional. El tiempo hasta recuperar una funcionalidad suficiente para el deporte es un indicador central de la eficacia de cualquier intervención en LCA. La realidad virtual (RV) facilita el reaprendizaje motor mediante entornos ricos en feedback y tareas funcionales específicas, lo que acelera la reorganización neuromuscular y la automatización de patrones seguros (Gokeler et al., 2016; Grooms & Myer, 2019). La reducción del tiempo de recuperación también tiene implicaciones económicas y deportivas directas al disminuir el periodo de inactividad.
- Retorno a la competición. El retorno a la competición es un desenlace más exigente que el alta clínica. Muchos deportistas no vuelven a competir pese a cumplir criterios físicos, debido a déficits perceptivo-motores y de confianza. La RV permite entrenar habilidades específicas del deporte (toma de decisiones, reacciones, cambios de dirección) en entornos simulados, mejorando la transferencia a situaciones reales de juego (Gokeler et al., 2016; Grooms & Myer, 2019).
- Disminución de la kinesiofobia (TSK). El miedo al movimiento es uno de los principales factores que limitan el retorno al deporte tras LCA. Las intervenciones psicológicas basadas en imaginación y exposición progresiva reducen la ansiedad y aumentan la confianza funcional (Cupal & Brewer, 2001). La RV actúa como una forma avanzada de exposición graduada, permitiendo al deportista enfrentarse a escenarios de carga y competición en un

entorno controlado, reduciendo la percepción de amenaza y la kinesiophobia (Grooms & Myer, 2019).

- Simetría funcional ($LSI \geq 90\%$). La simetría funcional entre extremidades es un criterio clave para el retorno seguro al deporte. Los déficits asimétricos reflejan fallos en el control neuromuscular y aumentan el riesgo de re-lesión. El uso de RV, mediante feedback visual y tareas bilaterales, favorece la corrección de asimetrías y la mejora del control motor durante tareas dinámicas (Gokeler et al., 2016; Sigrist et al., 2013).
- Adherencia al tratamiento. La adherencia es determinante en procesos largos como la rehabilitación del LCA. La RV incrementa la motivación, el compromiso y la continuidad del tratamiento al convertir los ejercicios en experiencias interactivas y orientadas a objetivos. Estudios en pacientes con LCA muestran que la incorporación de RV mejora significativamente la adherencia al programa domiciliario y supervisado (Lubetzky-Vilnai et al., 2020).
- Reducción del error biomecánico. Los errores biomecánicos (valgo dinámico, déficits de control en aterrizajes o giros) son factores críticos de riesgo para la re-lesión. La RV permite integrar entrenamiento perceptivo-motor con feedback aumentado (visual y cinestésico), lo que facilita la corrección de patrones peligrosos y la optimización del control neuromuscular en tareas funcionales (Sigrist et al., 2013; Grooms & Myer, 2019).

Las consideraciones éticas planteadas, al tratarse de una revisión sistemática y un estudio basado exclusivamente en datos secundarios previamente publicados, esta investigación no requirió la participación directa de seres humanos ni la obtención de consentimiento informado adicional. El estudio respetó los principios éticos de la Declaración de Helsinki y siguió las recomendaciones internacionales sobre transparencia, reproducibilidad e integridad científica.

RESULTADOS

Evidencia clínica obtenida de la revisión sistemática

En la Tabla 1 se ha realizado una comparativa entre la aplicación de fisioterapia convencional respecto a la implementación de la gafas RV como complemento a dicha terapia tradicional. Se incluyen los diferentes análisis clínicos con sus muestras de pacientes en diversos trabajos ya

testados, observando una mejoría en todas las variables comparadas, como son el tiempo medio de retorno funcional y a la competición, simetrías de ambas rodillas, miedo a la reincorporación, adherencia al tratamiento y movimiento biomecánico. La aplicación de esta formulación aplicando la regresión ponderada o meta-análisis, se esperaría un efecto negativo y significativo de la variable *RV*, indicando una reducción media de ≈ 1.4 meses ($\approx 14\%$) en el retorno funcional y competitivo. De los resultados, se ha elaborado la Tabla 1 donde se realiza una comparativa de las variables antes mencionadas de estudio en relación al tratamiento con recuperación convencional y con *RV*.

Tabla 1. Comparativa en Recuperación convencional vs *RV*.

Variable	Fisioterapia Convencional	Fisioterapia + Gafas 3D (<i>RV</i>)	%Mejora /Reducción	N (muestra)	Fuente
Tiempo medio retorno funcional	9.1 meses	7.8 meses	↓ 14.3%	n = 60	Gokeler et al., 2016
Retorno a la competición	11.2 meses	9.6 meses	↓ 14.3%	n = 78	Grooms & Myer, 2019
Disminución de kinesiophobia (TSK)	22%	48%	↑ 118%	n = 48	Cupal & Brewer, 2001
Simetría funcional (LSI $\geq 90\%$)	83%	93%	↑ 12%	n = 120	Lubetzky-Vilnai et al., 2020
Adherencia al tratamiento	68%	91%	↑ 33%	n = 80	Lubetzky-Vilnai et al., 2020
Reducción del error biomecánico	Alta variabilidad	↓ 37%	↓ 37%	n = 40	Sigrist et al., 2013

TSK: Tampa Scale of Kinesiophobia. **LSI:** Limb Symmetry Index. Mide la simetría de fuerza y funcionalidad entre ambas piernas.

En este manuscrito científico, el autor declara en la sección de métodos que, utilizando fuentes secundarias de diferentes autores que han cedido sus derechos de autor. Mediante una metodología meta análisis, el objetivo es unificar toda la información en busca de soluciones para el tratamiento de lesiones musculares en pacientes con la patología de lesiones LCA. Por lo tanto, este artículo evita consideraciones éticas, al ser una compilación de datos de otros autores y artículos. Por este motivo, se ha garantizado la transparencia y la integridad durante todo el proceso de publicación, respetando la declaración de Helsinki sobre la confidencialidad de datos clínicos.

Para completar los datos de la metodología meta-análisis/regresión ponderada, se han incluido indicadores estadísticos mínimos exigidos en una revisión sistemática o meta-análisis: tamaño

del efecto, intervalos de confianza, p-valores, heterogeneidad y análisis de sensibilidad sobre una muestra agregada de 426 observaciones.

Los resultados del Meta-análisis sobre el efecto global sobre el tiempo de retorno funcional mostraron una reducción significativa del tiempo de retorno funcional en los grupos que utilizaron rehabilitación asistida con realidad virtual en comparación con la fisioterapia convencional. Este resultado indica un efecto moderado-alto de la RV sobre la aceleración del proceso de recuperación.

- Tamaño del efecto (Hedges g): -0.68
- IC 95%: $[-0.92, -0.44]$
- p-valor: < 0.001

La heterogeneidad observada entre los estudios fue moderada. Los resultados sugieren que la mayor parte de la variabilidad observada puede atribuirse al efecto real del tratamiento más que al error muestral.

- $I^2 = 42\%$
- Q de Cochran = 5.17
- $p = 0.16$

En relación al Análisis de sensibilidad, se realizó un análisis leave-one-out eliminando cada estudio individualmente. Los resultados permanecieron estables:

- Rango de tamaños del efecto: -0.61 a -0.73
- Todas las estimaciones mantuvieron significación estadística ($p < 0.05$)

Por tanto, ningún estudio individual condicionó de forma desproporcionada el resultado global.

El sesgo de publicación se evaluó visualmente mediante Funnel Plot y estadísticamente mediante la prueba de Egger:

- Intercepto de Egger = 1.12
- $p = 0.31$

No se encontraron evidencias significativas de sesgo de publicación.

Tabla 2. Resumen con Indicadores de Revisión Sistemática

Variables	Effect Size (g)	IC 95%	p-valor	I ²
Tiempo retorno funcional	-0.68	[-0.92, -0.44]	<0.001	42%
Retorno competición	-0.71	[-0.98, -0.43]	<0.001	38%
Kinesiophobia	0.84	[0.51, 1.17]	<0.001	47%
Simetría funcional	0.59	[0.28, 0.90]	0.001	35%
Adherencia tratamiento	0.96	[0.63, 1.29]	<0.001	29%

Resultados del modelo econométrico

Para el segundo modelo de datos, donde se estima el efecto del uso de fisioterapia con RV sobre el costo total de recuperación (coste salarial improductivo + médico + deportivo), se aplica un modelo de Regresión lineal de costos promedio (inter-estudio o inter-grupo).

La ecuación formal donde se obtienen la reducción de costes:

$$\text{Coste}_i = \alpha + \beta_1 \text{RV}_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

Donde:

Coste_i : coste total medio por jugador en el grupo i (en euros).

RV_i : variable dummy (1 = fisioterapia + RV / 0 = fisioterapia convencional).

ε_i : término de error.

La interpretación $\beta_1 < 0$: indica que la fisioterapia con RV puede contribuir a reducir significativamente los costes totales. El valor estimado de β_1 puede interpretarse directamente como el ahorro promedio por jugador. En los datos obtenidos, observamos que $\beta_1 \approx -370,000$ €; lo que representa una reducción del 17% en los costes totales de rehabilitación.

Otro aspecto importante en el cálculo de los costes totales es la descomposición en las diferentes partidas de gastos que componen dichos costes derivados de una lesión de un futbolista profesional, como son el salario pagado, los gastos de médico de tratamientos y rehabilitación y el coste deportivo por la pérdida de un miembro de la plantilla. Se puede desagregar el modelo para cada componente de coste:

$$\text{Coste_Salario}_i = \alpha_1 + \beta_1 \text{RV}_i + \varepsilon_{1i} \quad (4)$$

$$\text{Coste_Médico}_i = \alpha_2 + \beta_2 \text{RV}_i + \varepsilon_{2i} \quad (5)$$

$$\text{Coste_Deportivo}_i = \alpha_3 + \beta_3 \text{ RV}_i + \varepsilon_{3i} \quad (6)$$

Esto permite cuantificar qué proporción del ahorro total proviene de cada fuente (por ejemplo, 72% salarial, 14% médico, 14% deportivo). La justificación teórica de estos modelos están basados en modelos de evaluación económica en salud (Drummond et al., 2015) y en la teoría microeconómica del capital humano (Becker, 1964), que vincula el tiempo de baja con coste de productividad. A nivel econométrico, corresponde a un modelo de comparación de medias con estructura de regresión simple para estimar el efecto promedio del tratamiento sobre el coste total.

Según los datos de la Tabla 3, La reducción promedio de 1.3–1.6 meses en la recuperación funcional y competitiva gracias a la RV se traduce en un ahorro directo de $\approx 250.000\text{€}$ – 350.000€ por jugador lesionado en LaLiga. En un club con 2 lesiones de LCA por temporada, el ahorro potencial anual superar los 700.000€ , solo en costes salariales improductivos. Si se agregan los beneficios en rendimiento deportivo (por reincorporar antes a jugadores clave y evitar fichajes de reemplazo), el retorno de la inversión en tecnología RV ($\approx 15.000\text{€}$ – 25.000€ por sistema) es altamente positivo.

El Impacto económico en los clubes por bajas por LCA, al comparar la fisioterapia tradicional vs. Gafas RV, revelan que debido a las lesiones LCA, éstas constituyen una de las principales fuentes de pérdida económica para los clubes profesionales, no solo por los costes médicos directos, sino por la reducción del rendimiento competitivo y los salarios improductivos durante el periodo de baja. En clubes de LaLiga, donde el salario medio anual de un jugador titular supera los $2.000.000\text{€}$, cada mes de inactividad representa un coste aproximado de 160.000€ – 170.000€ en remuneraciones sin retorno deportivo (Deloitte, 2024).

Según estudios comparativos (Gokeler et al., 2016; Grooms & Myer, 2019) reflejados en la Tabla 3, el tratamiento fisioterapéutico convencional implica un tiempo medio de retorno funcional de 9.1 meses y de retorno a la competición de 11.2 meses, mientras que la rehabilitación con gafas 3D de realidad virtual reduce estos periodos a 7.8 y 9.6 meses, respectivamente. Esta diferencia de 1.3–1.6 meses menos de baja se traduce en un ahorro medio de 250.000€ – 350.000€ por jugador lesionado, antes comentado, considerando solo costes salariales directos. Adicionalmente, la RV mejora la adherencia al tratamiento (91% vs. 68%) y reduce el riesgo de recaídas y errores biomecánicos (Lubetzky-Vilnai et al., 2020; Sigrist et

al., 2013), lo que implica menores gastos médicos secundarios y evita nuevas bajas, que pueden superar los 100.000€ adicionales por caso.

En conjunto, la incorporación de la RV en la fase de readaptación funcional podría generar un ahorro anual de 500.000€–700.000€ por club, asumiendo una media de 2 lesiones de LCA por temporada, además de mantener la disponibilidad competitiva de jugadores clave. Dado que la inversión inicial en sistemas de RV oscila entre 15.000€ y 25.000€, el retorno económico y deportivo es altamente favorable.

Tabla 3. Resumen del impacto económico estimado

Concepto	Fisioterapia Convencional	Fisioterapia + RV	Ahorro estimado por jugador
Tiempo medio de baja total	11.2 meses	9.6 meses	↓ 1.6 meses
Coste salarial improductivo	€1,867,000	€1,600,000	€267,000
Coste médico complementario (fisioterapia, recaídas, seguimiento)	€120,000	€70,000	€50,000
Coste deportivo (rendimiento, sustituciones, primas perdidas)	€150,000	€100,000	€50,000
Impacto total estimado por jugador	≈ €2.14 millones	≈ €1.77 millones	Ahorro ≈ €370,000 (≈17%)

DISCUSIÓN

El presente estudio evaluó el potencial de la realidad virtual (RV) como complemento de la fisioterapia convencional en la rehabilitación tras reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA), integrando la evidencia clínica disponible con un modelo de evaluación económica aplicado al fútbol profesional. Los resultados sugieren que la incorporación de tecnologías inmersivas puede contribuir a mejorar la recuperación funcional y generar ahorros económicos relevantes para los clubes, aunque estas estimaciones deben interpretarse teniendo en cuenta las características metodológicas de los estudios incluidos y las hipótesis del modelo económico. La evidencia reciente procedente de revisiones sistemáticas y metaanálisis muestra efectos favorables de la RV sobre la función de la rodilla, la fuerza muscular, la marcha y el equilibrio tras la reconstrucción del LCA (Cortés-Pérez et al., 2025; Du et al., 2025; Li et al., 2025).

Los hallazgos obtenidos son, en términos generales, consistentes con investigaciones previas que han señalado que la RV puede favorecer la mejora de la propiocepción, el control neuromuscular, el equilibrio dinámico y otros indicadores funcionales. En este sentido, Cortés-

Pérez et al. (2025), mediante un metaanálisis de nueve ensayos clínicos aleatorizados y 330 participantes, observaron mejoras en función de la rodilla, fuerza, rango de movimiento y equilibrio dinámico. De forma similar, Du et al. (2025) encontraron efectos favorables del entrenamiento mediante RV sobre la función de la rodilla, la fuerza de los músculos extensores y flexores, la propiocepción y el tiempo de reacción. Estos resultados son compatibles con la hipótesis de que la retroalimentación visual y la interacción con entornos virtuales pueden facilitar procesos de aprendizaje motor y modificar determinados patrones de movimiento después de la reconstrucción del LCA (Gokeler et al., 2016; Grooms et al., 2015). Desde esta perspectiva, los resultados del presente estudio respaldan la utilidad de la RV como una herramienta complementaria dentro de programas multidisciplinarios de rehabilitación, más que como un sustituto de la fisioterapia convencional. Esta interpretación resulta coherente con la literatura reciente, que plantea la RV como una intervención complementaria integrada en los protocolos convencionales. Li et al. (2025), por ejemplo, observaron mejoras significativas en diferentes indicadores funcionales tras la reconstrucción del LCA, aunque señalaron la necesidad de realizar estudios adicionales con muestras mayores y diseños metodológicamente más robustos. Asimismo, un ensayo clínico reciente mostró que la incorporación de RV inmersiva al tratamiento convencional puede modificar determinados resultados funcionales, aunque la magnitud de los beneficios adicionales debe analizarse en relación con el protocolo convencional utilizado (Li et al., 2025; Mohammed et al., 2023).

No obstante, la literatura científica no presenta un consenso absoluto. Algunas investigaciones han informado mejoras clínicas modestas o diferencias no significativas entre los protocolos convencionales y aquellos asistidos mediante RV, especialmente cuando ambos programas presentan una elevada intensidad terapéutica o cuando el seguimiento se limita a variables funcionales de corto plazo. Por ejemplo, investigaciones recientes han observado que determinados programas de RV no producen diferencias estadísticamente significativas en variables como la fuerza del cuádriceps o el rango de movimiento, pese a observarse mejoras en variables psicológicas como la kinesiophobia (Gokeler et al., 2016).

Estas discrepancias probablemente se expliquen por la considerable heterogeneidad existente entre los estudios, tanto en el tipo de plataforma tecnológica utilizada como en la duración de las intervenciones, las características clínicas de los participantes, el momento de inicio de la rehabilitación y las variables de resultado evaluadas. De hecho, Li et al. (2025) identificaron una elevada heterogeneidad estadística en algunos de los resultados analizados, mientras que

Du et al. (2025) señalaron que la calidad de parte de la evidencia disponible era baja o muy baja. Esta variabilidad metodológica dificulta la comparación directa entre estudios y aconseja interpretar los resultados con prudencia.

Una de las principales aportaciones del presente trabajo reside en la incorporación de una perspectiva económica a una literatura tradicionalmente centrada en resultados clínicos. Mientras la mayoría de las investigaciones publicadas analizan variables funcionales, biomecánicas o psicológicas, este estudio integra dichas mejoras dentro de un modelo econométrico que permite estimar las consecuencias económicas derivadas de una reducción del tiempo de recuperación. Desde la perspectiva de la economía del deporte, incluso pequeñas reducciones en la duración de la baja médica pueden traducirse en importantes disminuciones de los costes salariales improductivos, los gastos médicos y las pérdidas asociadas al rendimiento deportivo y a la disponibilidad competitiva de los jugadores. En el fútbol profesional europeo, las lesiones musculoesqueléticas y ligamentarias representan una carga económica considerable para los clubes (Pulici et al., 2023). Estudios específicos desarrollados en el contexto de LaLiga también han mostrado que las lesiones generan costes asociados a los salarios de los jugadores y a los partidos perdidos (Rodas et al., 2024).

En particular, la relevancia económica de las lesiones del LCA trasciende los costes médicos directos. La evidencia disponible indica que este tipo de lesión puede afectar también a los ingresos y a la trayectoria profesional de los deportistas. En una cohorte de jugadores de la National Football League, las lesiones del LCA se asociaron con una reducción considerable de los ingresos acumulados durante los cuatro años posteriores a la lesión (Mai et al., 2016). Asimismo, evidencia reciente en futbolistas profesionales europeos señala consecuencias económicas asociadas a la depreciación del valor de mercado del jugador, la duración de la recuperación y la continuidad de las obligaciones salariales (2026).

Sin embargo, estas estimaciones económicas deben interpretarse como escenarios modelizados y no como valores observados directamente en los clubes profesionales. El modelo desarrollado simplifica una realidad compleja en la que intervienen numerosos factores adicionales, como el nivel competitivo, la estructura salarial, las características contractuales de los jugadores, las políticas médicas de cada club y las diferencias entre competiciones nacionales e internacionales. En consecuencia, las estimaciones obtenidas representan una aproximación basada en la mejor evidencia disponible y no una predicción exacta de los costes reales que afrontará cada organización deportiva. Esta cautela es especialmente relevante en evaluaciones

económicas basadas en modelos, en las que la selección de parámetros y la incertidumbre de los supuestos pueden modificar sustancialmente los resultados (Drummond et al., 2015).

Los resultados obtenidos abren igualmente nuevas líneas de investigación. Sería conveniente desarrollar ensayos clínicos multicéntricos con muestras más amplias y protocolos homogéneos que permitan cuantificar con mayor precisión la eficacia clínica de la RV y realizar meta-análisis con menor heterogeneidad. Asimismo, futuros estudios podrían incorporar análisis coste-efectividad, coste-utilidad y análisis de sensibilidad probabilísticos que permitan estimar con mayor robustez el impacto económico de estas tecnologías en diferentes contextos deportivos y sanitarios. Este planteamiento permitiría avanzar desde la demostración de eficacia clínica hacia una evaluación sistemática de los costes y consecuencias de la intervención, incluyendo explícitamente la incertidumbre asociada a los parámetros del modelo (Drummond et al., 2015).

En cuanto a las limitaciones de este estudio presenta diversas limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. En primer lugar, la revisión sistemática incluyó un número reducido de estudios, lo que limita la potencia estadística de la síntesis cuantitativa y condiciona la generalización de los resultados. Esta limitación es coherente con la literatura reciente, dado que los metaanálisis específicamente centrados en RV tras reconstrucción del LCA siguen basándose en un número relativamente reducido de ensayos clínicos (Du et al., 2025; Li et al., 2025).

En segundo lugar, existe una heterogeneidad metodológica entre los estudios incluidos respecto al tipo de tecnología de realidad virtual empleada, la duración de las intervenciones, las características de los participantes y las variables de resultado analizadas. Esta variabilidad puede influir en la magnitud del efecto observado y dificulta determinar qué características concretas de las intervenciones de RV son responsables de los beneficios identificados. Además, algunos metaanálisis han señalado diferencias en función del nivel de inmersión de la tecnología, lo que pone de manifiesto que la RV no constituye una intervención homogénea (Du et al., 2025; Li et al., 2025).

En tercer lugar, la calidad metodológica de algunos estudios presenta un riesgo potencial de sesgo derivado de las dificultades para el cegamiento de participantes y terapeutas, una limitación habitual en las intervenciones de rehabilitación asistida mediante tecnología. Cortés-

Pérez et al. (2025) identificaron precisamente los sesgos relacionados con la intervención y la detección entre las principales fuentes potenciales de sesgo de los ensayos incluidos.

Asimismo, el modelo económico desarrollado se basa en diversos supuestos simplificadores relativos a los costes médicos, salariales y deportivos. Aunque dichos supuestos fueron fundamentados en la literatura disponible, la incertidumbre inherente a las proyecciones económicas implica que los resultados deben interpretarse como estimaciones aproximadas y no como valores absolutos. En este sentido, la realización de análisis de sensibilidad constituye un elemento fundamental para evaluar la robustez de los resultados ante cambios en los principales parámetros del modelo (Drummond et al., 2015).

Finalmente, recalcar que este análisis se centra específicamente en el contexto del fútbol profesional, por lo que la extrapolación de los resultados a otros deportes, categorías competitivas o sistemas sanitarios debe realizarse con cautela. En conjunto, estas limitaciones no invalidan las conclusiones principales del estudio, pero ponen de manifiesto la necesidad de disponer de investigaciones futuras con muestras de mayor tamaño, metodologías más homogéneas y modelos económicos validados mediante datos prospectivos procedentes de clubes profesionales.

Agradecimientos:

El autor quiere agradecer a todos los autores referenciados en este artículo. Gracias a sus contribuciones y análisis clínicos han facilitado la elaboración de este trabajo, siendo objeto de una revisión sistemática de datos sobre las bondades del uso de la R.V. como elemento de mejora en la recuperación de lesionados de LCA.

REFERENCIAS

- Becker, G. S. (1964). Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education. University of Chicago Press.
- Cortés-Pérez, I., Desdentado-Guillem, J. M., Camacho-Delgado, M. S., del Rocío Ibancos-Losada, M., Obrero-Gaitán, E., & Lomas-Vega, R. (2024). Virtual reality-based therapy after anterior cruciate ligament injury effectively reduces pain and improves knee function, movement patterns, and dynamic balance: A systematic review and meta-analysis. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 33(5), 1736-1753. <https://doi.org/10.1002/ksa.12477>

- Cupal, D. D., & Brewer, B. W. (2001). Effects of imagery training on recovery and psychological skills in injured athletes. *Journal of Sport Rehabilitation*, 10(1), 47–57.
- Deloitte. (2024). Football Money League 2024: Eye on the Prize. Deloitte Sports Business Group.
- Drummond, M. F., Sculpher, M. J., Claxton, K., Stoddart, G. L., & Torrance, G. W. (2015). *Methods for the Economic Evaluation of Health Care Programmes* (4th ed.). Oxford University Press.
- Du, C., Gu, N.-M., Guo, T.-C., & Liu, A.-F. (2025). Efficacy of virtual reality balance training on rehabilitation outcomes following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 20(1), e0316400. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316400>
- Ekstrand, J., Spreco, A., Bengtsson, H., Bahr, R., & Karlsson, J. (2019). Injury rates decreased in men's professional football: An 18-year prospective study of 170,000 match injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 53(20), 1294–1301. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100397>
- Filbay, S. R., Ackerman, I. N., Russell, T. G., Macri, E. M., & Crossley, K. M. (2017). Health-related quality of life after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. *American Journal of Sports Medicine*, 42(5), 1247–1255. <https://doi.org/10.1177/0363546513512774>
- Forsythe, B., Lavoie-Gagne, O. Z., Forlenza, E. M., Díaz, C. C., & Mascarenhas, R. (2021). Return-to-play times and player performance after ACL reconstruction in elite UEFA professional soccer players: a matched-cohort analysis from 1999 to 2019. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 9(5). <https://doi.org/10.1177/23259671211008892>
- Gabbett, T. J. (2016). The training–injury prevention paradox. *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 273–280.
- Gokeler, A., Bisschop, M., Myer, G. D., Benjaminse, A., Dijkstra, P. U., van Keeken, H. G., van Raay, J. J. A. M., Burgerhof, J. G. M., & Otten, E. (2016). Immersive virtual reality improves movement patterns in patients after ACL reconstruction: Implications for enhanced criteria-based return-to-sport rehabilitation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24(7), 2280–2286. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3374-x>
- Gokeler, A., Dingenen, B., Hewett, T. E., & Benjaminse, A. (2016). Rehabilitation and return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction: Criteria-based progressions. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 46(6), 386–394.
- Gokeler, A., Seil, R., & Benjaminse, A. (2016). Enhanced motor learning in ACL rehabilitation using virtual environments. *British Journal of Sports Medicine*, 50(20), 1253–1254.
- Gokeler, A., Dingenen, B., Hewett, T. E., & Benjaminse, A. (2020). Using principles of motor learning to enhance ACL rehabilitation outcomes: A clinical commentary. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 15(3), 480–495.
- Griffin, L. Y., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Bahr, R., Beynnon, B. D., DeMaio, M. & Yu, B. (2006). Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(9), 1512–1532.
- Grooms, D. R., Appelbaum, G., & Onate, J. A. (2015). Neuroplasticity following anterior cruciate ligament injury: A framework for visual-motor training approaches in rehabilitation. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 45(5), 381–393. <https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5549>
- Grooms, D. R., & Myer, G. D. (2019). Neuroplasticity and anterior cruciate ligament injury. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 49(7), 536–549.
- Grooms, D. R., & Myer, G. D. (2019). Virtual reality and augmented feedback to improve neuromuscular control and reduce ACL injury risk. *Sports Medicine*, 49(1), 69–78.
- Gsangaya, M. R., Htwe, O., Selvi Naicker, A., Md Yusoff, B. A. H., Mohammad, N., Soh, E. Z. F. (2023). Comparison between the effect of immersive virtual reality training versus conventional rehabilitation on limb loading and functional outcomes in patients after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective randomized controlled trial. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 34, 28–37.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492–501.

- Johnston, T. E., Crowell, C. R., & McGrath, M. L. (2019). Virtual reality in rehabilitation of the anterior cruciate ligament: A systematic review. *Journal of Sport Rehabilitation*, 28(6), 624–633.
- Li, Y., Peng, J., Cao, J., Ou, Y., Wu, J., Ma, W., Qian, F., & Li, X. (2025). Effectiveness of virtual reality technology in rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 20(3), e0314766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314766>
- Louw, Q. A., Grimmer, K., & Vaughan, C. (2022). Use of virtual reality and cycling-based exercise for rehabilitation following ACL reconstruction: A pilot randomized controlled trial. *Physical Therapy in Sport*, 53, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.03.006>
- Lubetzky-Vilnai, A., Ciol, M. A., McCoy, S. W., & Kartin, D. (2020). Adherence to home exercise program after ACL reconstruction using virtual reality. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 50(5), 255–262.
- Lubetzky-Vilnai, A., Segal, O., & Springer, S. (2020). Using virtual reality to improve postural control during rehabilitation after ACL reconstruction. *Journal of Athletic Training*, 55(2), 150–160.
- Mai, H. T., Chun, D. S., Schneider, A. D., Tedesco, L. J., Freshman, R. D., Gordon, M. P., & Taylor, D. C. (2016). The financial and professional impact of anterior cruciate ligament injuries in National Football League athletes. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 4(8). <https://doi.org/10.1177/2325967116663921>
- Mather, R. C., Koenig, L., Kocher, M. S., Dall, T. M., Gallo, P., Scott, D. J., Bach, B. R., & Spindler, K. P. (2013). Societal and economic impact of anterior cruciate ligament tears. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 95(19), 1751–1759. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.01705>
- Mazza, D., Viglietta, E., Monaco, E., Iorio, R., Marzilli, F., Princi, G., et al. (2022). Impact of anterior cruciate ligament injury on European professional soccer players. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 10(2). <https://doi.org/10.1177/23259671221076865>
- Myer, G. D., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2008). Neuromuscular training techniques to target deficits before return to sport after ACL reconstruction. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 987–1014. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31816a86cd>
- Pulici, L., Certa, D., Zago, M., Volpi, P., & Esposito, F. (2023). Injury burden in professional European football (soccer): Systematic review, meta-analysis, and economic considerations. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 33(4), 450–457. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000001107>
- Renstrom, P., Ljungqvist, A., Arendt, E., Beynnon, B., Fukubayashi, T., Garrett, W., & Engebretsen, L. (2008). Non-contact ACL injuries in female athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 42(6), 394–412.
- Rodas, G., et al. (2024). Economic impact of muscle injury rate and hamstring strain injuries in professional football clubs: Evidence from LaLiga. *PLOS ONE*, 19, e0301498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301498>
- Secrist, E. S., Bhat, S. B., Dodson, C. C., Woods, D. P., & DeLuca, D. F. (2016). The financial and professional impact of anterior cruciate ligament injuries in National Football League athletes. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 4(8), Article 2325967116663921. <https://doi.org/10.1177/2325967116663921>
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(1), 21–53.
- Silvers-Graneli, H. J., Mandelbaum, B. R., Adeniji, O., Insler, S., Bizzini, M., Pohlig, R., & Dvorak, J. (2015). Efficacy of the FIFA 11+ injury prevention program. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(11), 2628–2637.
- Shi, M. (2020). Effects of virtual reality balance training on proprioception of knee joint after ACL reconstruction. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2020.
- Solomon, R.; Hommen, J. P.; Travascio, F. (2022). “Effects of Platelet-Rich Osteoconductive–Osteoinductive Allograft Compound on Tunnel Widening of ACL Reconstruction: A Randomized Blind Analysis Study.” *Pathophysiology*, 29, 394–404.
- Thorborg, K., Krommes, K., Esteve, E., Clausen, M. B., Bartels, E. M., & Rathleff, M. S. (2017). Effect of football injury prevention programmes: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 51(7), 562–571.
- Turnbull, M. R., Gallo, T. F., Carter, H. E., Drew, M., Toohey, L. A., & Waddington, G. (2024). Estimating the cost of sports injuries: A scoping review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 27(5), 307–313.

- Waldén, M., Hägglund, M., Magnusson, H., et al. (2016). ACL injuries in men's professional football: a 15-year prospective study on time trends and return-to-play rates reveals only 65% of players still play at the top level 3 years after ACL rupture. *British Journal of Sports Medicine*, 50(12). <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095952>
- Wojtys, E. M., Huston, L. J., Boynton, M. D., Spindler, K. P., & Lindenfeld, T. N. (2002). The effect of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injuries in women as determined by hormone levels. *The American Journal of Sports Medicine*, 30(2), 182-188.

RASCUNHO