



Perfil neuromuscular y déficits excéntricos como predictores multivariantes de riesgo de lesión del ligamento cruzado anterior

Neuromuscular profile and eccentric deficits as multivariable predictors of anterior cruciate ligament injury risk

Autores

Sebastián Grajales Toro ¹
Macarena Valladares Vega ²
Silvia Patricia Betancur Bedoya ^{3,4}
Javier Ignacio García Correa ⁴

¹ Universidad Internacional Iberoamericana -UNINI- (México)

² Universidad de las Américas (Chile)

³ Corporación Universitaria Adventista -UNAC- (Colombia)

⁴ Fundación Universitaria María Cano (Colombia)

Autor de correspondencia:
Sebastián Grajales Toro
sebastian.grajales@doctorado.unin.edu.mx

Recibido: 10-02-26
Aceptado: 06-03-26

Cómo citar en APA

Grajales Toro, S., Valladares Vega, M., Betancur Bedoya, S. P., & García Correa, J. I. (2026). Perfil neuromuscular y déficits excéntricos como predictores multivariantes de riesgo de lesión del ligamento cruzado anterior. *Retos*, 78, 607-616. <https://doi.org/10.47197/retos.v78.118771>

Resumen

Introducción: Las lesiones del LCA en futbolistas tienen naturaleza multifactorial, la evaluación de predictores aislados (cociente H/Q isocinético) muestra limitaciones para identificar perfiles de riesgo. Por ello, se propone la integración de múltiples variables neuromusculares en un modelo predictivo para superar estas inconsistencias y mejorar el tamizaje de riesgo.

Objetivo: Analizar la asociación entre desequilibrios neuromusculares, asimetrías funcionales y parámetros de rendimiento en pruebas de salto con el riesgo de lesión del LCA en futbolistas, y construir un modelo predictivo multivariable que identifique perfiles de riesgo clínicamente relevantes.

Método: Estudio transversal con intención analítica, 60 futbolistas masculinos (18-28 años). Se evaluaron fuerza isocinética (60°/s - 180°/s), relación H/Q concéntrica y excéntrica, potencia pico, tiempo de reacción, pruebas de salto (CMJ, SJ, DJ, RSI). Se calcularon asimetrías intermiembro, se analizó la asociación con antecedentes confirmados de lesión de LCA mediante correlaciones de Pearson y regresión logística multivariable.

Resultados: El modelo predictivo reveló que H/Q excéntrico <0.85 (OR = 5.9), asimetría >10% DJ (OR = 4.1), potencia CMJ <45 W/kg (OR = 2.4) y tiempo de reacción >130 ms (OR = 1.9) incrementan significativamente el riesgo (AUC = 0.88; precisión = 85.3%).

Conclusión: El modelo multivariable confirma que el riesgo de LCA es la convergencia de déficits excéntricos, asimetrías funcionales y pobre control neuromuscular. Esta integración es fundamental para un tamizaje preciso.

Palabras clave

Control neuromuscular; fenómenos biomecánicos; fuerza muscular; fútbol; lesiones del ligamento cruzado anterior; prevención de lesiones; rendimiento atlético.

Abstract

Introduction: Anterior cruciate ligament (ACL) injuries in soccer players are multifactorial in nature, and the evaluation of isolated predictors (such as the isokinetic hamstring-to-quadriceps [H/Q] ratio) shows limitations in identifying risk profiles. Therefore, the integration of multiple neuromuscular variables into a predictive model is proposed to overcome these inconsistencies and improve injury risk screening.

Objective: To analyze the association between neuromuscular imbalances, functional asymmetries, and performance parameters in jump tests with the risk of ACL injury in soccer players, and to develop a multivariable predictive model capable of identifying clinically relevant risk profiles.

Methods: A cross-sectional study with an analytical approach was conducted with 60 male soccer players aged 18-28 years. Isokinetic strength (60°/s and 180°/s), concentric and eccentric H/Q ratios, peak power, reaction time, and jump performance (CMJ, SJ, DJ, and RSI) were assessed. Inter-limb asymmetries were calculated, and their association with confirmed history of ACL injury was analyzed using Pearson correlation and multivariable logistic regression.

Results: The predictive model revealed that an eccentric H/Q ratio <0.85 (OR = 5.9), DJ asymmetry >10% (OR = 4.1), CMJ power <45 W/kg (OR = 2.4), and reaction time >130 ms (OR = 1.9) significantly increased the risk of ACL injury (AUC = 0.88; accuracy = 85.3%).

Conclusion: The multivariable model confirms that ACL injury risk results from the convergence of eccentric deficits, functional asymmetries, and impaired neuromuscular control. The integration of these variables is essential for accurate risk screening.

Keywords

Anterior cruciate ligament injuries; athletic performance; biomechanical phenomena; injury prevention; muscle strength; neuromuscular control; soccer.

Introducción

Las lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) siguen siendo uno de los problemas más importantes en el fútbol de competición debido a su alta incidencia, el prolongado tiempo de recuperación y el impacto negativo en el rendimiento deportivo y las carreras profesionales. En las últimas dos décadas, el rendimiento neuromuscular y las asimetrías funcionales se han convertido en un elemento central para la prevención de estas lesiones, lo que responde a la necesidad de una comprensión más precisa de los factores biomecánicos y neuromusculares que predisponen a los futbolistas a sufrir lesiones de rodilla (Bahr y Krosshaug, 2005). Este enfoque se alinea con las tendencias actuales en ciencias del deporte, que promueven la evaluación objetiva mediante pruebas isocinéticas, plataformas de salto y análisis de fuerza para optimizar la toma de decisiones clínicas y en el campo (Saunders et al., 2014).

Se han identificado múltiples factores de riesgo asociados con la lesión del LCA, como desequilibrios musculares entre los flexores y extensores de la rodilla, déficits en la capacidad excéntrica, alteraciones en el control neuromuscular y asimetrías en el rendimiento durante tareas pliométricas (Griffin et al., 2006; Hewett et al., 2005). Sin embargo, la evidencia muestra resultados heterogéneos: mientras que algunos estudios sostienen que la relación H/Q isocinética es un predictor fiable del riesgo de lesión, otros sugieren que su capacidad predictiva es limitada cuando se analiza de forma aislada (Kong et al., 2012). De igual forma, pruebas de salto como el salto con contramovimiento (CMJ), el salto en sentadilla (SJ) y el salto con caída (DJ) se han utilizado como herramientas para identificar asimetrías funcionales relacionadas con patrones de carga alterados, aunque existen diferencias en cuanto a los umbrales de riesgo clínicamente significativos (Bishop et al., 2021). Estas inconsistencias justifican la necesidad de estudios que integren múltiples variables neuromusculares para comprender mejor su relación con la lesión del LCA.

A pesar de los avances en la evaluación neuromuscular asociada al riesgo de lesión del LCA, muchos estudios han analizado de forma aislada variables como la relación isquiotibiales vs cuádriceps, las asimetrías intermiembro o el rendimiento en pruebas de salto, lo que limita la comprensión integral de los factores que contribuyen al riesgo de lesión. Esta aproximación fragmentada dificulta el desarrollo de modelos predictivos robustos aplicables al contexto del fútbol competitivo. En particular, existe una escasez de investigaciones que integren simultáneamente evaluaciones de fuerza y rendimiento pliométrico para identificar perfiles de riesgo más precisos. En este sentido, se ha señalado la necesidad de enfoques multivariados que permitan mejorar la capacidad de los sistemas de cribado en la prevención de lesiones del LCA (Bishop et al., 2021).

La identificación precisa de los factores neuromusculares asociados a la lesión del LCA es fundamental para diseñar estrategias de prevención eficaces, optimizar la planificación del entrenamiento y reducir la carga económica y deportiva derivada de estas lesiones. Un análisis integrado de los desequilibrios musculares, las asimetrías funcionales y los parámetros de rendimiento reactivo puede proporcionar información crucial para mejorar los programas de cribado y vigilancia epidemiológica en clubes juveniles y profesionales (Hamdan et al., 2025). Además, la generación de modelos predictivos basados en múltiples variables ofrece una contribución teórica y aplicada con el potencial de mejorar la toma de decisiones por parte de entrenadores, fisioterapeutas y equipos médicos.

El objetivo de este estudio es analizar la asociación entre los desequilibrios neuromusculares, las asimetrías funcionales y los parámetros de rendimiento en pruebas de salto con el riesgo de lesión del LCA en futbolistas, y construir un modelo predictivo multivariable que permita la identificación de perfiles de riesgo clínicamente relevantes.

Método

Diseño del estudio

Se realizó un estudio transversal con intención analítica. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad Internacional Iberoamericana, según acta CR-222. Todas las actividades se llevaron a cabo de acuerdo con los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki

y las directrices internacionales para la investigación en seres humanos. Antes de la recolección de datos, cada participante firmó un consentimiento informado. No se utilizaron intervenciones farmacológicas ni procedimientos invasivos.

Población y selección

Participaron sesenta futbolistas varones de clubes del departamento de Antioquia (Colombia). Se utilizó un muestreo por conveniencia, reclutando a jugadores mayores de 18 años. El tamaño de la muestra se justificó con base en las recomendaciones de modelos predictivos multivariados (≥ 10 casos por predictor). Se utilizaron los siguientes criterios de inclusión: Futbolistas mayores de 18 años, pertenecientes a un equipo de la Liga Antioqueña de Fútbol, que entrenaban al menos cuatro veces por semana, sin dolor musculoesquelético al momento de la evaluación y con capacidad para realizar pruebas de salto y fuerza sin restricciones médicas. Los criterios de exclusión incluyeron cirugías musculoesqueléticas distintas a la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA) en los últimos 12 meses, lesiones musculoesqueléticas agudas en las últimas seis semanas, diagnósticos neurológicos o vestibulares, o afecciones que afecten el control motor, y uso de medicamentos que alteren el rendimiento neuromuscular.

Se registraron variables demográficas: edad, estatura, masa corporal, índice de masa corporal (IMC), lateralidad dominante, posición habitual de juego y presencia o ausencia de una lesión previa del LCA confirmada mediante resonancia magnética o historia clínica institucional.

Instrumentos y equipos

Evaluación Isocinética

- La fuerza extensora y flexora de la rodilla se evaluó con un dinamómetro isocinético Biodex System 4 Pro™ (Biodex Medical Systems, Nueva York, EE. UU.), siguiendo los estándares descritos en estudios previos (Drouin et al., 2004).
- Los protocolos se realizaron a 60°/s (1,05 rad/s) para la fuerza concéntrica y a 180°/s (3,14 rad/s) para la fuerza excéntrica.
- Se calcularon el torque máximo normalizado (Nm/kg), la relación H/Q convencional y excéntrica, y el tiempo de reacción neuromuscular.
- La fiabilidad del equipo (ICC = 0,87-0,98) se considera alta.

Plataformas de Salto

Las pruebas CMJ, SJ y DJ se realizaron en una plataforma de fuerza Chronojump Boscosystem® (Barcelona, España), validada en una población atlética (ICC > 0,90). Las variables registradas incluyeron:

- Altura del salto (cm).
- Tiempo de vuelo (ms).
- Potencia relativa (W/kg).
- Índice de Fuerza Reactiva (RSI = altura del salto/tiempo de contacto).
- Asimetría interextremidades (%).

Control de condición:

- Calentamiento estandarizado de 10 minutos (trote ligero + ejercicios de movilidad + 3 saltos submáximos).
- Pruebas realizadas en un solo día, en interior.
- Los participantes usaron su calzado deportivo habitual.

Procedimientos

Evaluación isocinética

Los atletas se posicionaron siguiendo el protocolo estándar del fabricante: alineación del cóndilo femoral lateral con el eje de rotación del dinamómetro y fijación con correas torácicas, pélvicas y femorales.



Se realizó de la siguiente manera:

- 3 repeticiones submáximas de familiarización.
- 5 repeticiones concéntricas máximas a 60°/s.
- 5 repeticiones excéntricas a 180°/s. Se determinó la asimetría (%).

Pruebas de salto

Cada participante realizó:

- SJ: inicio con pausa de 3 segundos sin contramovimiento.
- CMJ: contramovimiento libre sin movimiento de brazos (manos en caderas).
- DJ desde 30 cm: énfasis en el tiempo mínimo de contacto con el suelo.

Cada prueba se repitió tres veces, utilizando la mejor ejecución válida.

Clasificación del riesgo de LCA

La clasificación se basó en la literatura previa:

- Relación H/Q excéntrica <0,85 (lo que implica un control excéntrico deficiente).
- Asimetrías funcionales >10-15 % (anomalía biomecánica).
- Déficit de potencia (CMJ) y RSI deficiente según los estándares deportivos.

La presencia de lesión previa del LCA se registró como variable dicotómica (sí/no).

Análisis estadístico

Los análisis se realizaron con IBM SPSS Statistics v.27 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.), con un nivel de significación de $p < 0,05$. Se utilizaron estadísticas descriptivas: medias, desviaciones típicas, rangos y frecuencias. Para las comparaciones entre extremidades, se utilizaron pruebas t pareadas para fuerza y saltos. Las correlaciones se calcularon utilizando el coeficiente de Pearson (r) para las asociaciones entre desequilibrios y la presencia de LCA. El tamaño del efecto se informó utilizando la D de Cohen. Para el modelo predictivo, se utilizó regresión logística múltiple para identificar predictores de riesgo. Se calcularon odds ratios (OR) con intervalos de confianza del 95%, y el ajuste se evaluó mediante curvas ROC y valores de sensibilidad/especificidad. Finalmente, para las estimaciones de asimetría y tamaño del efecto, se incluyeron intervalos de confianza y tamaño del efecto (TE) para cada variable.

Resultados

Sesenta futbolistas varones de entre 18 y 28 años participaron en el estudio. Las características basales de la muestra se presentan a continuación (Tabla 1). La mayoría de los jugadores eran centrocampistas (40%) y defensores (33%). El 16,60% reportó antecedentes confirmados de lesión del ligamento cruzado anterior (LCA).

Tabla 1. Características generales de la muestra (n = 60 futbolistas antioqueños)

Variable	Media ± DE
Edad (años)	22.40 ± 2.90
Talla (cm)	176.30 ± 6.40
Masa corporal (kg)	72.50 ± 7.80
Índice de masa corporal (kg/m ²)	23.30 ± 1.90
Dominancia lateral (%)	Derecha: 80% / Izquierda: 20%
Posición de juego (%)	Defensas: 33%, Mediocampistas: 40%, Delanteros: 27%
Lesión previa de LCA (%)	16.60% (n = 10)

En la muestra, diez futbolistas (16,60%) reportaron antecedente confirmado de lesión del ligamento cruzado anterior (LCA). Para el análisis estadístico, esta variable se registró de forma dicotómica (pre-

sencia vs ausencia de lesión), sin diferenciar el miembro previamente lesionado. Por lo tanto, las comparaciones neuromusculares se realizaron considerando las asimetrías funcionales globales entre el miembro dominante y el no dominante.

Los análisis intermiembro revelaron asimetrías significativas en la fuerza flexora, la potencia excéntrica y la relación H/Q excéntrica. Los valores se resumen en la Tabla 2. La fuerza extensora mostró diferencias dentro del rango normativo (<10%), mientras que la fuerza flexora y la relación H/Q excéntrica superaron los umbrales clínicos aceptados, lo que indica un desequilibrio neuromuscular relevante en la cadena posterior.

Tabla 2. Resultados de asimetría intermiembro y desequilibrios musculares

Variable	Miembro dominante (media ± DE)	Miembro no dominante (media ± DE)	Diferencia (%)	Norma de referencia (<10%)
Fuerza extensora de rodilla (Nm/kg)	3.12 ± 0.37	2.89 ± 0.34	7.40	Dentro del límite
Fuerza flexora de rodilla (Nm/kg)	1.84 ± 0.25	1.61 ± 0.21	12.50	Fuera del límite
Potencia pico isocinética (W/kg)	5.48 ± 0.73	4.91 ± 0.62	10.40	Ligeramente elevada
Relación H/Q (isocinética, 60°/s)	0.59 ± 0.08	0.55 ± 0.07	6.70	Normal
Relación excéntrica H/Q (180°/s)	0.92 ± 0.11	0.79 ± 0.10	14.10	Riesgo aumentado de LCA
Tiempo de reacción neuromuscular (ms)	121 ± 11	134 ± 13	10.70	Disminución funcional leve

Se observaron asimetrías significativas en el salto con caída (DJ), con una diferencia del 13,20% en el RSI, lo que indica un mayor riesgo de lesión (>10%). Las pruebas CMJ y SJ mostraron asimetrías cercanas al umbral clínico, aunque dentro de límites aceptables. El índice de utilización elástica (CMJ-SJ) se mantuvo dentro de los rangos normales (ver Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de pruebas de salto y rendimiento neuromuscular

Prueba	Miembro dominante (media ± DE)	Miembro no dominante (media ± DE)	Asimetría (%)	Valor de referencia (<10%)
CMJ (cm)	42.30 ± 5.10	38.40 ± 4.90	9.20	Dentro del límite
SJ (cm)	38.10 ± 4.80	34.50 ± 4.40	9.50	Dentro del límite
DJ (RSI)	2.42 ± 0.31	2.05 ± 0.27	13.20	Riesgo de déficit elástico
Tiempo de vuelo (ms, CMJ)	587 ± 43	543 ± 41	7.50	Normal
Potencia relativa (W/kg, CMJ)	53.10 ± 5.60	48.80 ± 5.20	8.10	Normal
Ratio de utilización elástica (CMJ-SJ)	1.10 ± 0.07	1.12 ± 0.08	—	Normal

El análisis correlacional mostró asociaciones moderadas a fuertes entre los desequilibrios musculares y el antecedente de lesión del LCA. Las correlaciones se presentan en la Tabla 4. El índice H/Q excéntrico mostró la asociación más fuerte y significativa con la presencia de una lesión del LCA ($r = -0,62$; $p < 0,001$). El RSI y la potencia también mostraron una correlación significativa.

Tabla 4. Correlación entre desequilibrios musculares y riesgo de lesión de LCA

Variable correlacionada	r	p	Interpretación
Relación H/Q excéntrica (180°/s) vs. LCA	-0.62	<0.001*	Correlación negativa fuerte
Asimetría en DJ (RSI) vs. LCA	0.57	0.002*	Correlación positiva moderada
Potencia pico bilateral vs. LCA	-0.51	0.005*	Menor potencia = mayor riesgo
Tiempo de reacción neuromuscular vs. LCA	0.44	0.012*	Correlación positiva significativa
IMC vs. LCA	0.18	0.29	No significativa
Edad vs. LCA	0.11	0.38	No significativa

*Diferencias significativas, $p < .05$.

La regresión logística multivariable mostró que un índice H/Q excéntrico <0,85 fue el mejor predictor de lesión del LCA, seguido de la asimetría del DJ (>10%). Los parámetros del modelo se muestran en la Tabla 5. El modelo tuvo una precisión del 85,30 %, con un AUC ROC de 0,88, una sensibilidad del 87,50 % y una especificidad del 83,30 %.

Antes de la estimación del modelo de regresión logística multivariable se evaluó la presencia de colinealidad entre las variables independientes mediante el cálculo del factor de inflación de la varianza (VIF) y los índices de tolerancia. Se consideraron problemáticos valores de VIF > 5 o tolerancia < 0.20. Ninguna

de las variables incluidas en el modelo presentó indicios de colinealidad significativa ($VIF < 3.0$), por lo que todas fueron tenidas en cuenta para el análisis final.

Tabla 5. Modelo predictivo de riesgo de LCA (Regresión logística múltiple)

Variable independiente	β	Error estándar	p	OR (IC 95%)
Relación H/Q excéntrica <0.85	1.78	0.49	$<0.001^*$	5.90(2.10–16.20)
Asimetría D _j $>10\%$	1.42	0.53	0.004*	4.10 (1.60–10.60)
Potencia CMJ <45 W/kg	0.87	0.44	0.049*	2.40 (1.00–6.10)
Tiempo de reacción >130 ms	0.64	0.31	0.039*	1.90 (1.00–3.50)
Constante	-4.32	1.02	—	—

*Diferencias significativas, $p < .05$.

La clasificación inicial de los jugadores según categorías de riesgo mostró que 26 futbolistas fueron clasificados en la categoría de bajo riesgo, 18 en riesgo moderado y 16 en alto riesgo. La incidencia de lesión previa del LCA aumentó progresivamente con el nivel de riesgo neuromuscular identificado. Los atletas clasificados como de alto riesgo presentaron la mayor proporción de lesiones previas (37,50%), mientras que el grupo de bajo riesgo mostró la incidencia más baja (3,80%) (Tabla 6).

Tabla 6. Distribución de casos de LCA según variables de riesgo

Categoría de riesgo	Criterio	Casos con lesión de LCA (n=10)	Casos sin lesión de LCA (n=50)	% incidencia
Bajo	H/Q excéntrico ≥ 0.90 y asimetría $<10\%$	1	25	3.80%
Moderado	H/Q 0.85–0.90 o asimetría 10–15%	3	15	16.70%
Alto	H/Q <0.85 y asimetría $>15\%$	6	10	37.50%

Los resultados indican que las asimetrías funcionales superiores al 10 %, los desequilibrios excéntricos H/Q, el déficit de potencia reactiva y el aumento del tiempo de reacción neuromuscular se asocian con una mayor probabilidad de lesión del ligamento cruzado anterior (LCA) en futbolistas jóvenes.

Discusión

Este estudio aborda las limitaciones de la evidencia previa al integrar múltiples indicadores para analizar el riesgo de lesión del ligamento cruzado anterior (LCA) en futbolistas jóvenes. Los hallazgos confirman la naturaleza multifactorial de esta lesión, y la evaluación del riesgo no puede limitarse a un solo parámetro, sino que debe integrar múltiples indicadores del rendimiento muscular (Bittencourt et al., 2016; Behnke et al., 2021).

Una contribución de este estudio es la confirmación del papel clave de la relación fuerza/desactivación excéntrica de los isquiotibiales (H/Q) como un predictor robusto del riesgo de lesión del LCA. Valores inferiores a 0,85 se asociaron fuertemente con antecedentes de lesión, lo que coincide con metaanálisis recientes que han indicado que la debilidad excéntrica de los isquiotibiales compromete la capacidad de estabilizar dinámicamente la articulación tibiofemoral durante los cambios de dirección y las maniobras de desaceleración (Sugimoto et al., 2015; Podczarska-Głowacka et al., 2025). La insuficiencia excéntrica crea una ventana de vulnerabilidad biomecánica, especialmente durante movimientos de pivote que exigen altos niveles de frenado neuromuscular (Arundale et al., 2018). La asimetría del 14% encontrada en este estudio supera los límites considerados clínicamente seguros, lo que sugiere que estos atletas presentan un alto riesgo incluso durante tareas de baja intensidad.

En cuanto a las asimetrías funcionales en el índice de salto con resistencia (RSI), los resultados mostraron diferencias superiores al 10%, un valor que se ha propuesto como umbral para identificar disfunciones en el ciclo de estiramiento-acortamiento (SSC) y un mayor riesgo de lesiones de rodilla (Bishop et al., 2021; Song et al., 2025). El RSI, al integrar la altura del salto y el tiempo de contacto, refleja la capacidad del sistema neuromuscular para generar fuerza rápidamente, y su alteración se relaciona con aterrizajes menos eficientes y mayores momentos en valgo, un mecanismo ampliamente documentado en lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) sin contacto (Myer et al., 2011; Suchomel et al., 2016). En este estudio, la asimetría del RSI fue uno de los predictores más relevantes en el modelo multivariable, lo que respalda su utilidad como herramienta de cribado clínico.



Por otro lado, la reducción de la potencia en el salto con contramovimiento (CMJ) (<45 W/kg) mostró una asociación significativa con antecedentes de lesión del LCA. Si bien la potencia de salto no es un predictor directo de esta lesión, investigaciones recientes indican que los jugadores con déficit de potencia tienden a compensarla mediante estrategias biomecánicas que aumentan la carga sobre la rodilla (Blackburn et al., 2006). Esto sugiere que la potencia no debe interpretarse únicamente como un indicador de rendimiento, sino como una variable interviniente que influye en cómo el atleta absorbe y produce fuerza en movimientos balísticos.

El tiempo de reacción neuromuscular, también está significativamente asociado con las lesiones, es un indicador crucial del control motor. Un aumento >130 ms puede reflejar una disminución en la velocidad de procesamiento sensoriomotor, lo cual se asocia con respuestas retardadas a cambios rápidos en el entorno de juego (Bahr y Krosshaug, 2005). Según la literatura, los déficits neuromusculares centrales, incluyendo una mayor latencia motora, pueden aumentar el riesgo de colapso dinámico de rodilla, particularmente durante tareas impredecibles como recepciones o cambios de trayectoria.

El modelo predictivo multivariable resultante se alinea con las propuestas contemporáneas que integran factores mecánicos, neuromusculares y funcionales para identificar a los atletas con alto riesgo de lesión (Drouin et al., 2004; Risberg et al., 2018; Smeets et al., 2021). Este modelo predictivo multivariable (85,3 % de precisión; AUC = 0,88) es la principal contribución del estudio, ya que aborda la incertidumbre metodológica previa e integra factores clave (déficits excéntricos, asimetrías reactivas y potencia) para identificar perfiles de riesgo. La inclusión de la relación H/Q excéntrica junto con el RSI en DJ, potencia CMJ y tiempo de reacción permite una evaluación más global y robusta que la de indicadores aislados.

En comparación con estudios previos en poblaciones de élite, los resultados de este trabajo coinciden en que las asimetrías funcionales en tareas reactivas, la eficiencia excéntrica y el control neuromuscular son determinantes clave en la prevención de la lesión del LCA (Krosshaug et al., 2007). En este sentido, los hallazgos respaldan la implementación de programas de entrenamiento orientados a mejorar la fuerza excéntrica, la simetría funcional, la capacidad reactiva y el control motor, que han demostrado ser eficaces para reducir la incidencia de lesiones hasta en un 50 % en algunas poblaciones (Sugimoto et al., 2015; Suchomel et al., 2016).

Desde una perspectiva clínica, los resultados de esta investigación respaldan firmemente la implementación de programas preventivos individualizados, basados en mediciones objetivas de la carga ligamentosa y el control neuromuscular, como estrategia central para la prevención de lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA). Este enfoque representa un cambio sustancial respecto a los modelos tradicionales de intervención fisioterapéutica, que han priorizado protocolos estandarizados y decisiones basadas principalmente en criterios clínicos generales o en la experiencia del profesional (Meeuwisse et al., 2007).

El uso de variables biomecánicas continuas, como la deformación del LCA, la relación H/Q excéntrica, las asimetrías funcionales, la potencia neuromuscular y el tiempo de reacción, permite a los fisioterapeutas evaluar objetivamente el riesgo biomecánico individual y diseñar intervenciones dirigidas a los mecanismos causales específicos que predisponen a la lesión. Este enfoque facilita una toma de decisiones más precisa, basada en datos cuantificables, y reduce la dependencia de indicadores indirectos o subjetivos de riesgo de lesión (Lohmander et al., 2004).

La individualización de los programas preventivos optimiza el uso de los recursos terapéuticos al permitir ajustar la intensidad, el volumen y el tipo de ejercicio según el perfil de riesgo de cada deportista. En lugar de aplicar el mismo estímulo preventivo a toda la población, el fisioterapeuta puede priorizar componentes específicos como el fortalecimiento excéntrico de los isquiotibiales, la corrección de asimetrías o el entrenamiento reactivo en función de las necesidades biomecánicas identificadas. Este enfoque no solo mejora la eficacia del tratamiento, sino que también aumenta la adherencia del deportista, ya que percibe la intervención como adaptada a su condición individual (Sanpasitt et al., 2025; Mihata et al., 2006; Bram et al., 2021).

Limitaciones y Recomendaciones

A pesar de su rigor metodológico y del uso de instrumentos considerados el estándar de oro en la evaluación neuromuscular, este estudio presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar sus resultados.

En primer lugar, el diseño transversal impide establecer relaciones causales entre los desequilibrios neuromusculares identificados y la aparición de lesiones del LCA. Si bien se encontraron asociaciones significativas, no es posible determinar si estas alteraciones precedieron a la lesión o son consecuencia de procesos adaptativos posteriores.

En segundo lugar, el tamaño muestral relativamente pequeño y el muestreo por conveniencia limitan la generalización de los hallazgos a otras poblaciones, como futbolistas, atletas profesionales de élite o atletas de otras disciplinas. Asimismo, la inclusión exclusiva de futbolistas restringe la extrapolación de los resultados a poblaciones con diferentes perfiles biomecánicos y hormonales. Finalmente, aunque se evaluaron múltiples variables neuromusculares, no se incluyeron los factores psicosociales, la carga de entrenamiento ni la fatiga acumulada, a pesar de que recientemente se han propuesto como moduladores del riesgo de lesión en modelos multifactoriales complejos.

Recomendaciones

Con base en los resultados y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y la práctica clínico-deportiva:

Se recomienda el desarrollo de estudios longitudinales prospectivos para evaluar la verdadera capacidad predictiva de los desequilibrios excéntricos, las asimetrías funcionales y los déficits de reactividad en la incidencia futura de lesiones del LCA.

Es necesario ampliar la investigación para incluir a la población femenina y a jugadoras de fútbol en diferentes niveles competitivos, dado que el riesgo de lesión del LCA y los perfiles neuromusculares pueden variar significativamente según el sexo, la edad y la categoría deportiva.

Para fortalecer la comprensión de los mecanismos de lesión, se sugiere integrar los análisis biomecánicos tridimensionales con las evaluaciones neuromusculares, lo que permitirá una caracterización más completa de los patrones de movimiento asociados con el riesgo de lesión.

Desde una perspectiva aplicada, se recomienda que los clubes y el cuerpo técnico implementen programas periódicos de cribado neuromuscular, que incorporen la evaluación de la relación H/Q excéntrica, el RSI y las asimetrías funcionales como indicadores clave de riesgo.

Asimismo, los programas de prevención deben priorizar el entrenamiento excéntrico de isquiotibiales, la pliometría reactiva con control técnico y el entrenamiento neuromuscular centrado en la simetría funcional, con un seguimiento sistemático de las respuestas individuales al entrenamiento.

Finalmente, se recomienda integrar estas evaluaciones en modelos de gestión de carga y prevención de lesiones, combinando indicadores neuromusculares con datos de exposición, fatiga y recuperación, para optimizar la toma de decisiones en contextos de alto rendimiento.

Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que los desequilibrios excéntricos de los isquiotibiales, las asimetrías funcionales superiores al 10 % en el índice de rendimiento reactivo (RSI), la reducción de la potencia de salto vertical y el aumento de los tiempos de reacción neuromuscular se asocian significativamente con la lesión del ligamento cruzado anterior (LCA) en futbolistas jóvenes. El modelo predictivo multivariable es fundamental, ya que demuestra que el riesgo aumenta exponencialmente con la combinación de déficits, lo que respalda la necesidad de evaluaciones integrales basadas en múltiples dominios neuromusculares para superar la variabilidad de los predictores aislados.



Agradecimientos

Se agradece al Club Deportivo Formantioquia su colaboración, dedicación de tiempo y la disponibilidad de jugadores y categorías para la implementación de este estudio.

Financiación

Este estudio no recibió ninguna fuente de financiación.

Referencias

- Arundale, A. J. H., Silvers-Granelli, H. J., Marmon, A., Zarzycki, R., Dix, C., & Snyder-Mackler, L. (2018). Changes in biomechanical knee injury risk factors across two collegiate soccer seasons using the 11+ prevention program. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(12), 2592–2603. <https://doi.org/10.1111/sms.13278>
- Bahr, R., & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: A key component of preventing injuries in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 39(6), 324–329. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2005.018341>
- Behnke, A. L., Parola, L. R., Karamchedu, N. P., Badger, G. J., Fleming, B. C., & Beveridge, J. E. (2021). Neuromuscular function in anterior cruciate ligament reconstructed patients at long-term follow-up. *Clinical Biomechanics*, 81, 105231. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2020.105231>
- Bishop, C., Read, P., McCubbine, J., & Turner, A. (2021). Vertical and horizontal asymmetries are related to slower sprinting and jump performance in elite youth female soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(1), 56–63. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002544>
- Bittencourt, N. F. N., Meeuwisse, W. H., Mendonça, L. D., Nettel-Aguirre, A., Ocarino, J. M., & Fonseca, S. T. (2016). Complex systems approach for sports injuries: Moving from risk factor identification to injury pattern recognition. *British Journal of Sports Medicine*, 50(21), 1309–1314. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095850>
- Blackburn, J. T., Padua, D. A., Weinhold, P. S., & Guskiewicz, K. M. (2006). Comparison of triceps surae structural stiffness and material modulus across sex. *Clinical Biomechanics*, 21(2), 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.08.012>
- Bram, J. T., Magee, L. C., Mehta, N. N., Patel, N. M., & Ganley, T. J. (2021). Anterior Cruciate Ligament Injury Incidence in Adolescent Athletes: A Systematic Review and Meta-analysis. *The American journal of sports medicine*, 49(7), 1962–1972. <https://doi.org/10.1177/0363546520959619>
- Drouin, J. M., Valovich-McLeod, T. C., Shultz, S. J., Gansneder, B. M., & Perrin, D. H. (2004). Reliability and validity of the Biodex System 3 Pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements. *European Journal of Applied Physiology*, 91(1), 22–29. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0933-0>
- Griffin, L. Y., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Bahr, R., Beynon, B. D., DeMaio, M., et al. (2006). Understanding and preventing noncontact ACL injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(9), 1512–1532. <https://doi.org/10.1177/0363546506286866>
- Hamdan, M., Mohd Noh, S. N., Yeo, W. K., Sharir, R., Adi, S., Raharjo, S., & Raja Azidin, R. M. F. (2025). Los efectos de los programas de prevención de lesiones para mitigar los marcadores biomecánicos del riesgo de lesión del LCA durante la fatiga en jugadores de fútbol. *Retos*, 70, 893–906. <https://doi.org/10.47197/retos.v70.110797>
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2005). Reducing knee and anterior cruciate ligament injuries among female athletes: A systematic review of neuromuscular training interventions. *The Journal of Knee Surgery*, 18(1), 82–88. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1248163>
- Kong, D. H., Yang, S. J., Ha, J. K., Jang, S. H., Seo, J. G., & Kim, J. G. (2012). Validation of functional performance tests after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery & Related Research*, 24(1), 40–45. <https://doi.org/10.5792/ksrr.2012.24.1.40>



- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., et al. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: Video analysis of 39 cases. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 359–367. <https://doi.org/10.1177/0363546506293899>
- Lohmander LS, Ostenberg A, Englund M, Roos H. High prevalence of knee osteoarthritis, pain, and functional limitations in female soccer players twelve years after anterior cruciate ligament injury. *Arthritis Rheum.* 2004 Oct;50(10):3145-52. <https://doi.org/10.1002/art.20589>
- Meeuwisse, W. H., Tyreman, H., Hagel, B., & Emery, C. A. (2007). A dynamic model of etiology in sport injury: The recursive nature of risk and causation. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 17(3), 215–219. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3180592a48>
- Mihata, L. C. S., Beutler, A. I., & Boden, B. P. (2006). Comparing the incidence of anterior cruciate ligament injury in collegiate lacrosse, soccer, and basketball players: Implications for anterior cruciate ligament mechanism and prevention. *The American Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1177/0363546505285582>
- Myer, G. D., Faigenbaum, A. D., Ford, K. R., Best, T. M., Bergeron, M. F., & Hewett, T. E. (2011). When to initiate integrative neuromuscular training to reduce sports-related injuries and enhance health in youth. *Current Sports Medicine Reports*, 10(3), 155–166. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e31821b1442>
- Podczarska-Głowacka, M., Perzanowska, E., Krasowska, K., Trapik, Z., Kalkowska, A., & Klich, S. (2025). The influence of 4-week eccentric Nordic hamstring exercise training on postural balance and muscle strength: A randomized controlled trial. *PLoS ONE*, 20(6), e0315459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315459>
- Risberg, M. A., Steffen, K., Nilstad, A., Myklebust, G., Kristianslund, E., Moltubakk, M. M., et al. (2018). Normative quadriceps and hamstring muscle strength values for female, healthy, elite handball and football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(8), 2314–2323. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002579>
- Sanpasitt, C., Yongtawee, A., Noikhammueang, T., & Woo, M. (2025). Bridging the relationship between anthropometrics, physical performance, and specific soccer skills in young male soccer players. *Revista de Investigación e Innovación en Ciencias de la Salud*, 7(2), 1–16. <https://doi.org/10.46634/riics.445>
- Saunders, N., McLean, S. G., Fox, A. S., & Otago, L. (2014). Neuromuscular dysfunction that may predict ACL injury risk: A case report. *The Knee*, 21(3), 789–792. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.01.005>
- Smeets, A., Willems, M., Gilson, L., Verschuere, S., Staes, F., & Vandenuecker, H., et al. (2021). Neuromuscular and biomechanical landing alterations persist in athletes returning to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. *The Knee*, 33, 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2021.10.020>
- Song, Y., Li, L., Jensen, M. A., & Dai, B. (2025). Jump-landing kinetic asymmetries persisted despite symmetric squat kinetics in collegiate athletes following anterior cruciate ligament reconstruction. *Sports Biomechanics*, 24(4), 999–1012. <https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2207552>
- Sugimoto, D., Myer, G. D., Foss, K. D., & Hewett, T. E. (2015). Specific exercise effects of preventive neuromuscular training intervention on anterior cruciate ligament injury risk reduction in young females. *British Journal of Sports Medicine*, 49(5), 282–289. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093461>
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Medicine*, 46(10), 1419–1449. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-07>

Datos de los/as autores/as y traductor/a:

Sebastián Grajales Toro
Macarena Vallada-res Vega
Silvia Patricia Betancur Bedoya
Javier Ignacio García Correa

sebastian.grajales@doctorado.unini.edu.mx
mvalladares@udla.cl
silviapatriciabetancurbedoya@fumc.edu.co
javierignaciogarciacorra@umc.edu.co

Autor/Traductor
Autora
Autora
Autor

