Modelo Predictivo de Lesiones de Tobillo en Árbitros de Fútbol del Departamento del Cauca Basado en Inteligencia Artificial

Ft. Yeison Iván Méndez Jiménez

Lic. Fabian Alberto Perea Medina



Universidad del Cauca

Universidad del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y De La Educación

Maestría en Deporte y Actividad Física

Popayán

2026

Modelo Predictivo de Lesiones de Tobillo en Árbitros de Fútbol del Departamento del Cauca Basado en Inteligencia Artificial

Ft. Yeison Iván Méndez Jiménez

Lic. Fabian Alberto Perea Medina

Proyecto de investigación para optar por el título de Magister en Deporte y Actividad Física

Director del proyecto

Andrés Felipe Villaquiran Hurtado



Universidad del Cauca

Universidad del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y De La Educación

Maestría en Deporte y Actividad Física

Popayán

2026

Nota de aceptación:

El director y los jurados del presente trabajo de grado titulado" Modelo Predictivo de Lesiones de Tobillo en Árbitros de Fútbol del Departamento del Cauca Basado en Inteligencia Artificial", elaborado por Fabian Alberto Perea Medina y Yeison Iván Méndez Jiménez, una vez revisado y aprobado el presente documento al igual que la sustentación del mismo, autorizan a los estudiantes para dar inicio a los tramites académicos y así obtener el título de Magister en Deporte y Actividad Física.



Mg. Andrés Felipe Villaquiran Hurtado
Director.



Mg. Juan Martin Hurtado Paz
Jurado.



Mg. Jonathan Muñoz Luna
Jurado.

Popayán 30 de septiembre 2026

CONTENIDO

Pág.

Introducción 10

1 Problema 13

2 Objetivos 16

2.1 Objetivo General 16

2.2 Objetivos Específicos 16

3 Justificación 17

4 Metodología 22

4.1 Enfoque 22

4.2 Diseño y Alcance 22

4.2.1 Hipótesis 22

4.3 Población y Muestra 22

4.3.1 Criterios de Inclusión 23

4.3.2 Criterios de Exclusión 23

4.4 Técnicas e Instrumentos 23

4.4.1 Procedimiento de Recolección de la Información 23

4.5 Aspectos éticos y legales 34

5 Resultados 35

5.1 Caracterización sociodemográficas y antecedentes deportivos de la muestra de estudio. 35

5.2 Determinación de los factores de riesgo intrínsecos modificables, el comportamiento de la carga y la incidencia de lesión de tobillo en árbitros 38

5.3 Algoritmo basado en inteligencia artificial para analizar y procesar los datos capturados para detectar tendencias, agrupamiento o patrones que indiquen el riesgo de lesión de tobillo. 57

6 Discusión 69

7 Aplicaciones Prácticas 87

8 Conclusiones 88

9 Limitaciones del Estudio 90

10 Referencias 91

Anexos 103

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Pruebas aplicadas en la investigación 24

Tabla 2. Promedio de partidos dirigidos y entrenamientos realizados por semana por los participantes 37

Tabla 3. Resistencia muscular de pantorrillas y prueba de salto Counter Movement Jump (CMJ) 41

Tabla 4. Desempeño de los modelos de clasificación para la predicción de lesiones de tobillo . 67

Tabla 5. Matriz de confusión del modelo Random Forest 67

Tabla 6. Matriz de confusión del modelo Random Forest para la predicción de lesiones de tobillo 68

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Pipeline del modelo de inteligencia artificial 30

Figura 2. Características antropométricas de la muestra de estudio. 36

Figura 3. Pruebas de estabilidad articular de tobillo 39

Figura 4. Pruebas de movilidad articular de tobillos y caderas 40

Figura 5. Rendimientos de saltos unipodales y saltos laterales en árbitros de fútbol. 42

Figura 6. Pruebas de equilibrio dinámico y estático en árbitros de fútbol. 44

Figura 7. Diagnóstico de lesiones presentadas durante el seguimiento a los árbitros de fútbol. . 45

Figura 8. Momentos en los que los árbitros de fútbol presentaron lesión en los tobillos. 46

Figura 9. Severidad de las lesiones reportadas por los árbitros de fútbol participantes en el estudio. 47

Figura 10. Seguimiento del test de bienestar de los árbitros lesionados durante los 4 meses. 48

Figura 11. Seguimiento del test de bienestar de los árbitros no lesionados durante 4 meses. 49

Figura 12. Carga aguda de entrenamiento de los árbitros lesionados 50

Figura 13. Carga aguda de entrenamiento de los árbitros no lesionados 51

Figura 14. Carga aguda de partidos de los árbitros lesionados 51

Figura 15. Carga aguda de partidos de los árbitros no lesionados 53

Figura 16. Comparación de las cargas crónicas de partidos durante los 4 meses de seguimiento. 54

Figura 17. Comparación de las cargas crónicas de entrenamientos de los árbitros durante los 4 meses de seguimiento. 55

Figura 18. Carga crónica/aguda durante los 4 meses de seguimiento a los árbitros. 56

Figura 19. Perfiles promedio por clúster de los árbitros de fútbol del Cauca. 60

Figura 20. Clúster de movilidad de tobillo mediante lunge test (N: 30) 61

Figura 21. Comparativo de simetría del Y-Balance Test por clúster de los árbitros de fútbol. ... 62

Figura 22. Clúster de comparación de masa musculo esquelética entre árbitros lesionados y no lesionados 63

Figura 23. Clúster de comparación de porcentaje de grasa corporal entre árbitros lesionados y no lesionados 64

Figura 24. Variables más importantes para la predicción de lesiones en árbitros de fútbol 65

Lista de Anexos

Pág.

Anexo A. Consentimiento informado 103

Anexo B. Hojas de recolección de la información 107

Introducción

El fútbol moderno exige que los árbitros tengan un alto nivel de preparación física y mental, teniendo en cuenta que deben ser capaces de soportar esfuerzos de alta intensidad durante los partidos. Además, deben tomar decisiones adecuadas en condiciones de estrés y fatiga. Por esta razón, realizar seguimientos al bienestar, a las cargas de entrenamiento y a los partidos resulta fundamental para la prevención de lesiones y optimizar el rendimiento deportivo.

Las lesiones deportivas representan un gran desafío para los profesionales que trabajan en el campo de la medicina deportiva y en las ciencias aplicadas a la actividad física, ya que estas pueden generar un impacto negativo en el rendimiento deportivo y en la salud de quienes la padecen. Las lesiones de tobillo presentan alta incidencia en el contexto deportivo. Diferentes investigaciones (Vidal, 2019; Popkin, 2022; Zhai, 2022) han señalado que los esguinces de tobillo son una de las lesiones que con mayor frecuencia se reportan.

En este sentido, la prevención y la predicción de lesiones se han convertido en un tema de gran interés en el deporte. Tradicionalmente, estos análisis se han realizado mediante métodos estadísticos clásicos, los cuales permiten identificar asociaciones entre variables. Sin embargo, estos enfoques presentan algunas limitaciones cuando se trabaja con múltiples variables físicas, funcionales y psicológicas al mismo tiempo, ya que pueden dificultar la identificación de patrones complejos relacionados con el riesgo de lesión.

Ante esta situación, en los últimos años, la inteligencia artificial y las técnicas de aprendizaje automático han comenzado a utilizarse en el campo del deporte y la medicina deportiva, debido a su capacidad para analizar grandes cantidades de datos de manera simultánea, identificar patrones ocultos y clasificar perfiles de riesgo entre los deportistas. Estas herramientas permiten complementar los análisis estadísticos tradicionales, facilitando la identificación de grupos de individuos con características similares y diferentes a niveles de riesgo de lesión.

Esta investigación ofrece, una aproximación integral al análisis del riesgo de lesión de tobillo en árbitros de fútbol del departamento del Cauca, abordando el problema desde una perspectiva científica, funcional y tecnológica. A lo largo del estudio, el lector encontrara un análisis detallado de variables físicas, neuromusculares y de bienestar subjetivo, tales como la movilidad articular, la fuerza muscular, la estabilidad dinámica, la fatiga, el estrés y la calidad de sueño, factores que pueden influir significativamente en la aparición de lesiones.

Además, se presenta un seguimiento longitudinal de cuatro meses que permitió identificar la incidencia, el momento de aparición y la severidad de las lesiones reportadas. Como elemento innovador, la investigación incorpora técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, mediante el uso de análisis por clústeres y modelos predictivos, con el fin de identificar perfiles de riesgo y patrones asociados a la lesión.

Los resultados permiten evidenciar relaciones estadísticamente significativas entre variables funcionales y de bienestar con la presencia de lesiones, aportando herramientas útiles para la planificación del entrenamiento, la prevención y la optimización del rendimiento arbitral.

En este sentido, el estudio no solo contribuye al conocimiento científico en las ciencias del deporte, sino que también propone una estrategia aplicada para la toma de decisiones en contextos reales del arbitraje deportivo.

Este estudio no solo busca aportar al fortalecimiento del rendimiento deportivo de los árbitros, si no también generar evidencia sobre los factores asociados a la presencia de lesiones en los tobillos en árbitros de fútbol, así como promover el uso de la tecnología como estrategia para la prevención de lesiones deportivas.

1 Problema

Las lesiones deportivas son frecuentes en la práctica de diferentes disciplinas y representan un problema importante en el ámbito del deporte. Barros (2018) menciona que entre las lesiones más comunes se encuentran las contracturas musculares, contusiones, distensiones, desgarros musculares, tendinopatías, esguinces y distensiones de ligamentos. Dentro de estas, los esguinces de tobillo destacan por su alta incidencia, especialmente en deportes como el fútbol. En este sentido, Du X (2022) señala que este tipo de lesiones ocurre con frecuencia en personas que practican fútbol, evidenciando en su estudio que puede presentarse un caso de lesión de tobillo por cada 10.000 personas diariamente.

En el caso específico de los árbitros de fútbol, diferentes investigaciones han analizado la prevalencia de lesiones. Vidal cita estudios como el de Bizzini, quien reporta en 2009 una prevalencia de 44% de lesiones de tobillo en árbitros profesionales y un 40% en todas las categorías. Posteriormente, otros estudios también evidenciaron porcentajes importantes de lesiones en esta población, como el 33% reportados por Paes, el 35,6% por Da Silva y el 52% encontrado por Olivera en árbitros profesionales. Estos resultados muestran que las lesiones en árbitros no solo son frecuentes, sino que representan un problema constante dentro de esta población.

Además de la prevalencia de las lesiones, algunos estudios han analizado los momentos en los que estas ocurren con mayor frecuencia. Vidal (2019) encontró que el 66,57% de las lesiones en árbitros se presentaron durante los entrenamientos, mientras que el 25,71% ocurrió

durante los partidos y solo el 5,72% durante las pruebas físicas. De manera similar, Mahdavi (2018) reporto que el 52% de las lesiones se produjeron en entrenamientos. Sin embargo, otros estudios presentan resultados diferentes. Popkin (2022) encontró que las lesiones se producen con mayor frecuencia durante los juegos en comparación con los entrenamientos, lo que evidencia que aún existen diferencias en los resultados reportados por la literatura.

De igual manera, Vidal (2020) señala que la incidencia de lesiones por partido puede variar entre 0,47 y 34,7 lesiones por cada 1.000 horas de juego, lo que demuestra la variabilidad existente en los datos reportados por diferentes investigaciones. Estas diferencias pueden estar relacionadas con factores como la carga de entrenamiento, el descanso, las condiciones físicas de los árbitros y las características propias de cada competición.

Las consecuencias de estas lesiones pueden ser significativas tanto a nivel físico como psicológico. Zhai (2022) menciona que las lesiones de tobillo pueden afectar no solo el rendimiento deportivo, sino también la vida laboral y cotidiana de las personas, pudiendo incluso generar consecuencias psicológicas. En este sentido, una lesión puede comprometer la continuidad de la práctica deportiva y afectar el desempeño profesional de los árbitros.

En el contexto colombiano esta situación puede resultar aún más compleja. Letrado (2020), señala que los árbitros de fútbol en Colombia no se encuentran profesionalizados y su contratación se realiza principalmente mediante el modelo de prestación de servicios. Esto implica que, cuando un árbitro sufre una lesión y no puede desempeñar su labor, también puede verse afectado su ingreso económico. Por esta razón, una lesión no solo representa un problema deportivo, sino también una dificultad económica y social para muchos árbitros.

A pesar de la importancia de este problema, la literatura científica muestra que existe poca información específica sobre los factores asociados a las lesiones de tobillo en árbitros de fútbol, especialmente en contextos regionales como el departamento del Cauca. Por esta razón surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué variables físicas, neuromusculares y de bienestar se asocian con la aparición de lesiones de tobillo en árbitros de fútbol del departamento del Cauca y cómo pueden integrarse en un modelo predictivo basado en inteligencia artificial?

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo predictivo que identifique la probabilidad de sufrir una lesión de tobillo basado en inteligencia artificial.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer características sociodemográficas y antecedentes deportivos de la muestra de estudio.
- Determinar los factores de riesgo intrínsecos modificables, el comportamiento de la carga y la incidencia de lesión de tobillo en árbitros del departamento del Cauca
- Crear un algoritmo basado en inteligencia artificial que permita analizar y procesar los datos capturados para detectar tendencias, agrupamiento o patrones que indiquen el riesgo de lesión de tobillo.

3 Justificación

Las lesiones deportivas representan un problema importante dentro del ámbito del deporte, debido a su impacto en el rendimiento y en la salud de quienes la padecen. Diversos estudios han señalado que las lesiones pueden estar asociadas tanto a factores modificables como no modificables que influyen en su aparición (Sadigursky, 2017). En el caso del arbitraje en el fútbol, factores como la carga de partidos dirigidos, el nivel de fatiga y las condiciones físicas individuales pueden aumentar la probabilidad de lesiones, especialmente en articulaciones como el tobillo (Cipriano, 2019).

A pesar de la importancia de este problema, la literatura científica muestra que existen pocos estudios enfocados específicamente en las lesiones en árbitros de fútbol, y aun menos investigaciones centradas en lesiones de tobillo en esta población. (Cipriano, 2019) señala que la mayoría de las investigaciones relacionadas con la prevención de lesiones se han enfocado principalmente en futbolistas, dejando en segundo plano el análisis de los árbitros, quienes también están expuestos a altas cargas físicas durante la competición.

En este sentido, el presente estudio, buscó aportar al conocimiento científico mediante el análisis de variables relacionadas con el bienestar, la carga de trabajo, el rendimiento funcional y la composición corporal en árbitros de fútbol. De esta manera, se pretendió ampliar la evidencia existente sobre los factores que pueden estar asociados con la aparición de lesiones en esta población específica.

Los árbitros de fútbol, al igual que los jugadores, están expuestos a exigencias físicas y psicológicas elevadas durante la competición. Sarı, Z. & Polat, MG (2019) expone que, los árbitros corren de 9 a 13 km por partido, y los árbitros asistentes generalmente recorren más de 6 km en un partido, de los cuales 1,15 km requieren de una alta intensidad y en los desplazamientos laterales llegan a recorrer 1,16 km, estas exigencias físicas se incrementan debido a que los árbitros deben mantenerse cerca de las jugadas durante todo el encuentro, lo que genera niveles elevados de fatiga (Cipriano, 2019).

En el contexto colombiano, esta situación puede ser a un más compleja. De acuerdo con Letrado (2020), los árbitros de fútbol en Colombia no se encuentran profesionalizados y su contratación se realiza principalmente mediante el modelo de prestación de servicios. Esto implica que muchos árbitros deben combinar su actividad arbitral con otros trabajos o dirigir un número elevado de partidos para garantizar su sustento económico. Como consecuencia, la carga física semanal puede aumentar y los periodos de recuperación pueden disminuir, lo que podría incrementar el riesgo de sufrir lesiones. En este sentido, identificar factores asociados con el riesgo de lesión en árbitros puede contribuir al desarrollo de estrategias de prevención, así como al diseño de programas de entrenamiento más adecuados para esta población.

Los resultados de esta investigación pueden apoyar a la planificación del entrenamiento de los árbitros, permitiendo ajustar la carga física, el volumen de trabajo y los tiempos de recuperación, con el fin de reducir el riesgo de lesiones y mejorar el rendimiento deportivo. La utilización de métodos avanzados de análisis de datos resulta necesaria para detectar patrones

que no siempre son evidentes mediante métodos estadísticos convencionales. Esto se debe a la complejidad de los factores que influyen en la aparición de lesiones deportivas en árbitros de fútbol, entre los que se encuentran, nivel de fatiga, características antropométricas, carga de partidos y entrenamientos, el bienestar percibido y las habilidades funcionales.

En este contexto, las técnicas de inteligencia artificial permiten analizar múltiples variables de manera simultánea y explorar relaciones complejas entre factores físicos, funcionales y de bienestar. Dentro de estas herramientas, el aprendizaje automático, ha sido ampliamente utilizado en diferentes áreas de la ciencia del deporte para identificar patrones presentes en conjuntos de datos multivariados. De manera particular, algoritmos basados en ensamble como el Random Forest han demostrado un mejor desempeño frente a otros modelos de clasificación, destacándose por su robustez, estabilidad predictiva y capacidad para mejorar relaciones no lineales entre múltiples variables, así como datos desbalanceados (Pereira et al., 2025; juliandewit et al., 2025; Rosales Malpartida & Loo Gil, 2025)

Es importante diferenciar conceptualmente entre un proceso de clustering y un proceso de predicción. El clustering corresponde a una técnica de aprendizaje no supervisado, cuyo objetivo principal es agrupar individuos con características similares, sin partir de una variable dependiente previamente definida. En otras palabras, este procedimiento busca reconocer patrones ocultos dentro de los datos, permitiendo identificar perfiles homogéneos a partir de variables como la carga, el bienestar subjetivo, la fuerza, la movilidad y otros componentes funcionales. Por el contrario, un proceso de predicción corresponde al aprendizaje supervisado, en el cual, el modelo utiliza una variable, resultado previamente conocido, por ejemplo, lesión si,

o no, para estimar la probabilidad de ocurrencia futura de un evento. Este tipo de enfoque requiere un tamaño de muestra suficiente que permita una adecuada capacidad de generalización y validación del modelo.

A diferencia del estudio de Yusof Mohamed et al. (2025), que desarrollo un modelo predictivo con alta capacidad discriminativa a partir de una muestra amplia de 746 participantes, la presente investigación debe interpretarse desde un enfoque exploratorio debido al tamaño reducido de la muestra. En este sentido, las técnicas de clustering y clasificaciones empleadas permitieron identificar patrones de riesgo y asociaciones entre variables neuromusculares, de carga y bienestar subjetivo, más que establecer un modelo predictivo generalizable. Por esta razón se optó por utilizar el algoritmo de K-means, ya que este permite realizar un proceso de agrupación basado en la similitud de características entre los participantes, favoreciendo la identificación de perfiles con condiciones físicas, funcionales y de bienestar semejantes (Jain, 2010).

En el caso del presente estudio, esta técnica no buscaba predecir directamente la aparición de lesiones, sino identificar grupos o clústeres de árbitros con características similares, los cuales, posteriormente pudieron analizarse en relación con la mayor o menor presencia de lesión de tobillo. De esta manera, el análisis por clústeres permite explorar como diferentes variables se relacionan entre sí y como estas combinaciones de factores pueden asociarse con perfiles que representan mayor o menor riesgo de lesión. Este enfoque metodológico aporta una perspectiva interdisciplinaria entre las ciencias del deporte y el análisis de datos, contribuyendo

al desarrollo de nuevas herramientas para el estudio exploratorio de perfiles de riesgo asociados a lesiones deportivas.

4 Metodología

4.1 Enfoque

El presente estudio tuvo un enfoque cuantitativo.

4.2 Diseño y Alcance

Estudio longitudinal prospectivo y analítico.

4.2.1 Hipótesis

Las alteraciones en movilidad, fuerza y bienestar se asocian significativamente con la probabilidad de presentar lesiones de tobillo en árbitros de fútbol

4.3 Población y Muestra

Se realizó un muestreo tipo censo, contando con un total de 44 de los 50 árbitros de fútbol y fútbol sala de los diferentes colegios arbitrales de la ciudad de Popayán, quienes cumplieron los criterios de inclusión establecidos por el equipo investigador y no presentaron criterios de exclusión.

Los árbitros que no fueron incluidos en el estudio correspondieron a aquellos que presentaron más del 20% de incumplimiento en el seguimiento de las cargas y del registro de lesiones durante el periodo evaluado.

4.3.1 Criterios de Inclusión

- Pertenecer a la Asociación de Árbitros de Fútbol del Cauca o a un grupo arbitral en el departamento del Cauca.
- Ser mayor de edad
- Prestar servicios arbitrales actualmente en el departamento del Cauca.
- Aceptar participación en el estudio mediante firma de consentimiento informado.
- Presentarse a las evaluaciones programadas.
- No presentar lesiones osteomusculares al momento de iniciar el estudio.

4.3.2 Criterios de Exclusión

- No contar con dispositivo móvil para el seguimiento del estudio.
- No completar las evaluaciones programadas.
- Presentar un incumplimiento mayor del 20% en el seguimiento de carga y registro de lesiones.

4.4 Técnicas e Instrumentos

4.4.1 Procedimiento de Recolección de la Información

Para la recolección de la información, inicialmente se realizaron visitas institucionales a los diferentes colegios arbitrales que existen en la ciudad de Popayán, Cauca, con el propósito de presentar formalmente la investigación e invitar a sus integrantes a participar en el estudio.

Esta invitación fue aceptada por las directivas de cada grupo arbitral desde el componente administrativo, lo que permitió el acceso a la población objeto de estudio.

Posteriormente, se socializaron los objetivos, alcances y procedimientos metodológicos de la investigación con los árbitros que manifestaron su intención de participar voluntariamente. Una vez confirmada su participación, los sujetos fueron citados al laboratorio de fisioterapia de la Universidad del Cauca, donde se llevó a cabo la valoración inicial.

En esta fase, previo al inicio de cualquier procedimiento, cada participante firmo el consentimiento informado, garantizando el cumplimiento de los principios éticos relacionados con la investigación. Seguidamente, se procedió a la toma de datos iniciales mediante la aplicación de las siguientes pruebas (ver Tabla 1)

Tabla 1.
Pruebas aplicadas en la investigación

PRUEBA	¿QUE EVALÚA?	MÉTODO	HERRAMIENTAS
Antropométrica	Composición corporal (Porcentaje de grasa, masa magra, porcentaje de agua, índice de masa corporal)	Bioimpedancia eléctrica (el evaluado se subió a la báscula y con sus manos sostuvo el manubrio hasta que se evidencio los resultados en pantalla, al evaluado se le pidió retirarse todo tipo de elemento metálico durante la valoración)	Dispositivo IN BODY 270
Tiltest, Prueba del cajón	Laxitud articular	Valderrama (2018) la persona a evaluar mantuvo su tobillo en posición neutral, después de esto el evaluador realizó un movimiento de inversión del pie mientras que con su otra mano estabilizo la pierna, la prueba resultaba positiva si la persona refería dolor.	Fisioterapeuta, Camilla

PRUEBA	¿QUE EVALÚA?	MÉTODO	HERRAMIENTAS
		Valderrama (2018) la persona se ubicó en posición de decúbito supino sobre una camilla, la rodilla se posicionará de forma flexionada, mientras que la articulación del tobillo estuvo ubicada entre los 10° y los 15° de plantiflexion, a continuación, se realizó un movimiento anterior y posterior del tobillo, y se observó si se produjo un movimiento de gran rango, que permitiera establecer si existía una inestabilidad de esta articulación.	
Goniometría	Rangos de movimiento articular	Catelotti (2020) la persona a evaluar se ubicó en posición de decúbito supino sobre una camilla, la persona realizó los movimientos de plantiflexion, dorsiflexión, inversión y eversión, se tomaron las medidas en cada uno de estos movimientos con la ayuda del goniómetro, el resultado de esta prueba fue el mayor rango de movimiento alcanzado en cada movimiento.	Goniómetro
Lunge-test	Flexibilidad del tobillo	Alfaro (2017) el árbitro se colocó frente a la pared, y se le pedio que acerque la rodilla a esta sin levantar el talón del suelo, si al realizar el movimiento no es fue capaz de llegar a la pared, se le pidió acercarse un centímetro el pie hacia la pared, y se repitió el movimiento. El resultado final fue la distancia que exista entre la pared y el pie al lograr tocar la pared con la rodilla sin levantar el talón.	Cinta métrica
Standing Heel-Rise Test, Pavin	Fuerza-resistencia de la pantorrilla	Pavin (2018) se le pedio al evaluado realizar la elevación del talón cuantas veces sea posible. Durante el tiempo de prueba deberá mantener una alineación de sus miembros inferiores y su tronco. Se evaluó primero el miembro inferior derecho y seguido el izquierdo.	Step, Cronometro

PRUEBA	¿QUE EVALÚA?	MÉTODO	HERRAMIENTAS
Saltos counter movement jump (CMJ)	La potencia de salto	Balsalobre (2015) el evaluado realizo un salto vertical mientras se grabó con un dispositivo electrónico (celular o table) Después de esto, se analizaron los videos y se tomaron los resultados arrojados por la aplicación My Jump 2	Celular o table, Aplicación My Jump 2
La prueba de salto lateral	Asimetría de la fuerza muscular	Mastandrea (2023) el evaluado realizo 20 saltos unipodales de manera lateral. Se cuantificando el tiempo que le tomo realizar los saltos realizados por cada miembro inferior.	Cronometro
Y-Test	La estabilidad dinámica	Powden (2019) el participante debía sostener el equilibrio unipodal mientras que con el otro pie intenta alcanzar la mayor distancia en 3 planos diferentes, los cuales estaban determinados en anterior, posterolateral y posteromedial.	Marcación de los ejes de movimiento anterior, posterolateral y posteromedial.
Dinamometría	Fuerza máxima de tobillo y cadera	Kelln (2008) se le pidio al árbitro realizar los siguientes movimientos: abducción de cadera, plantiflexion, dorsiflexión, inversión y eversión en tobillos, sosteniendo 10 segundos cada movimiento, el dinamómetro arrojo la fuerza aplicada en cada movimiento.	Dinamómetro

Nota. La tabla presenta la relación de las diferentes pruebas, su definición teórica y las herramientas utilizadas.

Para garantizar la confiabilidad de las mediciones, los instrumentos utilizados en el estudio fueron sometidos a procesos de verificación y estandarización antes de su aplicación.

En las pruebas instrumentales se comprobó el correcto funcionamiento, el ajuste a cero y la estabilidad de los equipos, mientras que en las pruebas clínicas y funcionales se realizó una estandarización del protocolo de evaluación.

Todas las mediciones se efectuaron bajo las mismas condiciones, utilizando los mismo instrumentos, superficies y criterios de evaluación, con el objetivo de minimizar el error sistemático y el sesgo de medición.

Una vez finalizada la valoración inicial, se implementó un seguimiento longitudinal durante un periodo de cuatro meses, mediante la aplicación de una encuesta estructurada dos veces por semana, específicamente los lunes y viernes. La medición de los viernes estuvo orientada a evaluar la percepción del esfuerzo de los árbitros, en relación con las sesiones de entrenamiento realizadas durante la semana, mientras que la medición de los lunes, tuvo como objetivo valorar su condición posterior a la actividad competitiva de los partidos dirigidos el fin de semana anterior.

La encuesta para el seguimiento fue distribuida a través de la plataforma *WhatsApp* como medio de difusión, y la recolección sistemática de los datos se efectuó mediante *Google Forms*. Dentro de las variables registradas, se incluyeron aspectos relevantes para la investigación, tales como: modalidad arbitral, numero de partidos dirigidos en la semana inmediatamente anterior y percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), mediante una escala de 1 a 10, donde:

- 0 indicaba la ausencia de cansancio.
- 10 indicaba un nivel de cansancio extremadamente alto.

Posteriormente se aplicó el test de bienestar, el cual evalúa cuatro dimensiones:

- Calidad de sueño
- Estrés

- Fatiga
- Dolor muscular.

Cada variable fue evaluada mediante una escala de 1 a 7, donde en el caso del sueño 1 corresponde a muy bueno y 7 a muy malo, mientras que para estrés, fatiga y dolor muscular 1 corresponde a muy bajo y 7 a muy alto. Posteriormente, se incluyó una pregunta dicotómica (si/no) con el fin de identificar si el árbitro había presentado algún tipo de lesión en el tobillo durante entrenamientos o partidos en la semana inmediatamente anterior.

Finalmente, al culminar el periodo de seguimiento de cuatro meses, se realizó una valoración final aplicando nuevamente las mismas pruebas físicas, funcionales y neuromusculares efectuadas en la medición inicial, con el fin de comparar los cambios presentados durante el periodo de observación.

Control de sesgos. Con el fin de minimizar los posibles sesgos metodológicos, se implementaron diversas estrategias durante el desarrollo del estudio. Para el control del sesgo de selección, se incluyeron árbitros pertenecientes a la Asociación de árbitros de fútbol del Cauca que aceptaron participar de manera voluntaria mediante la firma del consentimiento informado, sin discriminación por antecedentes de lesión o nivel competitivo.

El sesgo de información fue controlado mediante la utilización de un cuestionario estructurado y estandarizado, el cual fue previamente adaptado a través de una prueba piloto. Este cuestionario se aplicó de manera uniforme en dos momentos de evolución: al inicio y al final del periodo de seguimiento.

Con el fin de disminuir el sesgo del observador, se implementó un protocolo uniforme para las evaluaciones, utilizando criterios de registro previamente definidos y variables claramente especificadas. Los datos obtenidos fueron registrados automáticamente en la plataforma de encuesta utilizada, lo cual permitió su sistematización simultáneamente con el proceso de recolección. Posteriormente, se utilizó el software IBM SPSS Statistics, para realizar el análisis estadístico descriptivo de todas las variables, mediante la distribución de frecuencias y porcentajes para las variables cualitativas, así como medidas de tendencia central y dispersión para las variables cuantitativas.

De manera complementaria, se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas, específicamente:

- Prueba de Chi-cuadrado.
- Coeficiente de correlación de Spearman.

Se estableció un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia estadística de $p < 0,05$.

En el presente estudio no se registraron valores perdidos, por lo tanto, todos los análisis se realizaron con la totalidad de los 44 participantes. Seguidamente, se implementó un proceso de aprendizaje automático (machine learning) con el objetivo de identificar patrones asociados al riesgo de lesión en los árbitros evaluados. El desarrollo del modelo siguió un *pipeline* de aprendizaje automático estuvo compuesto por varias etapas secuenciales, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1.

Pipeline del modelo de inteligencia artificial



Nota. La figura presenta Pipeline del modelo de inteligencia artificial, elaboración propia.

Antes de aplicar los algoritmos de aprendizaje automático se realizó un proceso de preprocesamiento de los datos, el cual incluyo:

- Revisión de consistencia de los registros.
- Verificación de valores faltantes.

- Normalización de variables continuas.
- Estandarización de las escalas de medición.

Este procedimiento se realizó con el objetivo de evitar que variables con magnitudes mayores influyeran de forma desproporcionada en el entrenamiento de los modelos. En este sentido, las variables fueron normalizadas para que todas tuvieran una escala comparable, lo cual permitió mejorar la estabilidad de los algoritmos de aprendizaje automático.

Con el objetivo de identificar perfiles similares entre los participantes se aplicó un método de aprendizaje no supervisado mediante el algoritmo K-means, el cual permite agrupar observaciones con características semejantes dentro de diferentes clústeres o grupos (Jain, 2010).

Este algoritmo funciona mediante la asignación interactiva de los datos al centroide más cercano, buscando minimizar la varianza dentro de cada grupo.

Para determinar el número adecuado de clústeres se utilizaron dos criterios:

- Método del codo (*elbow method*)
- Coeficiente de silueta (silhouette score)

Estos procedimientos permitieron identificar la estructura más adecuada para la agrupación de los datos.

En el conjunto de datos analizados, se identificó una distribución desigual entre las clases de interés, ya que, de los 44 árbitros evaluados, 12 presentaron lesión y 32 no presentaron lesión.

Debido a esta distribución desbalanceada, se evaluó el rendimiento de los modelos mediante métricas de clasificación sensible al desbalance de clases, como precisión, *recall*, lo que indica que el modelo logra identificar la mayoría de los casos de lesión, *y f1-score*, (balance) con el fin de obtener una evaluación más adecuada del desempeño predictivo.

El conjunto de datos fue dividido en dos subconjuntos:

- 70% de los datos para entrenamiento del modelo.
- 30% de los datos para prueba del modelo.

Esta división permitió evaluar la capacidad de generalización del modelo en datos que no fueron utilizados durante el proceso de entrenamiento.

Con el objetivo de mejorar la estabilidad de las estimaciones y reducir el riesgo de sobreajuste, se aplicó un procedimiento de validación cruzada tipo *k-fold* (k = 5).

Este método permite entrenar y evaluar el modelo en diferentes subconjuntos del conjunto de datos, lo cual mejora la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Posteriormente se evaluaron diferentes algoritmos de clasificación para estimar la probabilidad de lesión en los árbitros evaluados.

- Regresión logística.
- Árbol de decisión.
- Random Forest.

El árbol de decisión es un algoritmo de aprendizaje supervisado que permite clasificar observaciones mediante reglas basadas en variables predictoras (Blockeel et al., 2023).

Por su parte, Random Forest ha sido útil en muestras pequeñas, ya que tiene la capacidad de mejorar la estabilidad y precisión, mediante la elaboración de múltiples arboles de decisión, a partir de submuestras, esto permite reducir el riesgo de sobreajuste y mantener una adecuada viabilidad en muestras pequeñas, esto hace que mantenga un buen desempeño predictivo (Liu et al., 2021).

Los modelos fueron configurados utilizando hiper parámetros estándar. En el caso de Random Forest se utilizaron 100 árboles de decisión, mientras que en el árbol de decisión se limitó la profundidad máxima del modelo con el fin de evitar sobreajuste.

El rendimiento de los modelos fue evaluado mediante diferentes métricas de clasificación, incluyendo:

- *Accuracy*
- Precisión
- *Recall*
- *F1-score.*
- Matriz de confusión.

Estas métricas permiten evaluar tanto la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos (lesiones), como su desempeño general en clasificación de los participantes.

4.5 Aspectos éticos y legales

Para el desarrollo del estudio se tuvieron en cuenta los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki, los cuales regulan las investigaciones médicas en seres humanos. De acuerdo con la resolución 8430 de 1993, la presente investigación se clasifica como un estudio de riesgo mínimo, ya que no implica intervenciones biológicas ni procedimientos invasivos para los participantes. Asimismo, se garantizó la confidencialidad de la información recolectada, de acuerdo con lo establecido en la Ley 1581 de 2012 y el decreto 1377 de 2013, relacionados con la protección de datos personales.

5 Resultados

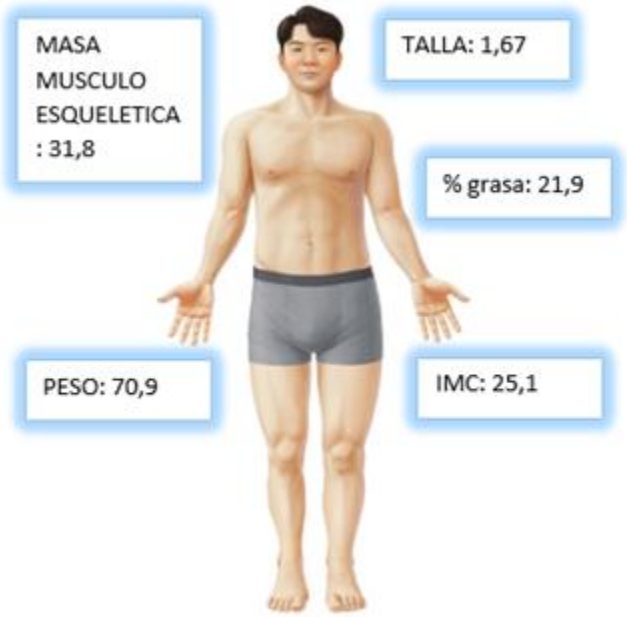
5.1 Caracterización sociodemográficas y antecedentes deportivos de la muestra de estudio.

En el presente estudio, se evidenció que en una muestra de 44 árbitros. De ellos, 39 (88,6%) fueron de sexo masculino y 5 (11,4%) de sexo femenino, el promedio de edad de los árbitros fue de 29 años. Los hombres presentaron un peso promedio de 71,62 ± 10,42 kg, mientras que las mujeres registraron 65,72 ± 11,74 kg, reflejando una diferencia acorde con el dimorfismo sexual típico. La talla promedio fue de 1,69 ± 0,06 metros para los hombres y 1,58 ± 0,02 metros para las mujeres. La menor variabilidad en la estatura femenina evidencia una distribución más homogénea en este grupo, en contraste con una mayor amplitud de valores en el grupo masculino, donde se observaron tallas desde 1,53 m hasta 1,81 m.

La masa de músculo esquelético fue notablemente mayor en hombres (31,79 ± 4,40 kg) en comparación con las mujeres (24,82 ± 2,72 kg). Por el contrario, el porcentaje de grasa corporal fue superior en mujeres (27,34 ± 6,52%) que en hombres (21,23 ± 5,75%). Respecto al índice de masa corporal (IMC), se observaron valores similares entre ambos sexos: 25,94 ± 3,33 en mujeres y 25,01 ± 2,94 en hombres (Ver Figura 2).

Figura 2.

Características antropométricas promedio de la muestra de estudio.



Nota. La figura presenta medidas antropométricas de referencia de la muestra de estudio. Elaboración propia.

En cuanto al deporte en el que se desempeñan, se observó una clara predominancia del fútbol, con 40 árbitros (90,9%) dedicados a esta disciplina, seguido por el fútbol sala, con 4 árbitros (9,1%). Respecto a la modalidad de arbitraje, 28 participantes (63,6%) se desempeñaban como árbitros centrales, mientras que 16 (36,4%) actuaban como asistentes. Esta distribución sugiere una estructura operativa mayormente centrada en la figura del árbitro principal. En relación con la categoría arbitral, se identificó que la mayoría de los participantes pertenecían a niveles formativos. La categoría Amateur fue la más representada, con 22 árbitros (50%), seguida por la categoría C con 20 participantes (45,5%). Las categorías B y A estuvieron escasamente representadas, con 1 participante cada una (2,3%).

Por último, el análisis del tiempo de práctica arbitral evidenció, como se ilustra en la tabla 2, una experiencia promedio de 6,05 ± 5,76 años, con un rango que va desde 1 hasta 21 años. El 50% de los participantes contaba con 4 años o menos de experiencia, mientras que el 25% superaba los 9,5 años, lo que sugiere una muestra heterogénea en términos de trayectoria profesional.

En la tabla 2 se puede observar, la carga semanal de entrenamiento y competencia de los árbitros evaluados, donde se encontró un patrón de dedicación constante. En promedio, los participantes reportaron realizar tres sesiones (3,0 ± 1,14 días) de práctica por semana, lo cual indica una frecuencia moderada de actividad física planificada.

Tabla 2.
Promedio de partidos dirigidos y entrenamientos realizados por semana por los participantes

	Frecuencia práctica (días)	**Partidos/semana**	**Minutos entrenamiento/día**
Promedio	3,0 ± 1,1	3,5± 1,3	105,7 ± 23,8
Mínimo	2	1	60
Máximo	5	7	120

Nota. La tabla presenta el promedio de partidos dirigidos y entrenamientos realizados, se incluye el máximo y mínimo. Elaboración propia.

En relación con la carga de competencia, se observó que los árbitros dirigieron un promedio de 3,48 ± 1,34 partidos por semana, con un rango que va desde 1 hasta 7 partidos, lo que sugiere una distribución variable de la carga competitiva entre los evaluados.

Respecto al tiempo diario de entrenamiento, la media fue de 105,68 ± 23,76 minutos por sesión, con valores que oscilaron entre 60 y 150 minutos.

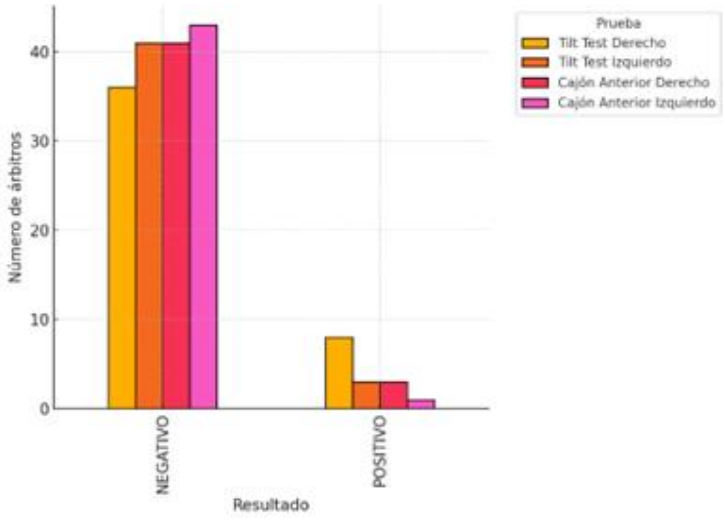
5.2 Determinación de los factores de riesgo intrínsecos modificables, el comportamiento de la carga y la incidencia de lesión de tobillo en árbitros

Con relación a las pruebas físicas y neuromusculares se encontró que los resultados de las pruebas clínicas Tilt Test y Cajón Anterior. En el Tilt Test del tobillo derecho, 36 participantes (81,8%) presentaron un resultado negativo, mientras que 8 participantes (18,2%) fueron positivos para laxitud articular. Para el tobillo izquierdo, los resultados mostraron una menor prevalencia de inestabilidad, con 41 árbitros (93,2%) negativos y solo 3 (6,8%) con resultado positivo.

La prueba de Cajón Anterior, orientada a evaluar la integridad del ligamento talofibular anterior, mostró resultados similares. En el tobillo derecho, 41 participantes (93,2%) fueron negativos y 3 (6,8%) positivos. En el tobillo izquierdo, la estabilidad fue aún mayor, con 43 árbitros (97,7%) negativos y solo 1 (2,3%) con resultado positivo. Estos hallazgos sugieren una baja incidencia de inestabilidad articular clínica en la muestra evaluada, particularmente en el tobillo izquierdo (Ver Figura 3).

Figura 3.

Pruebas de estabilidad articular de tobillo

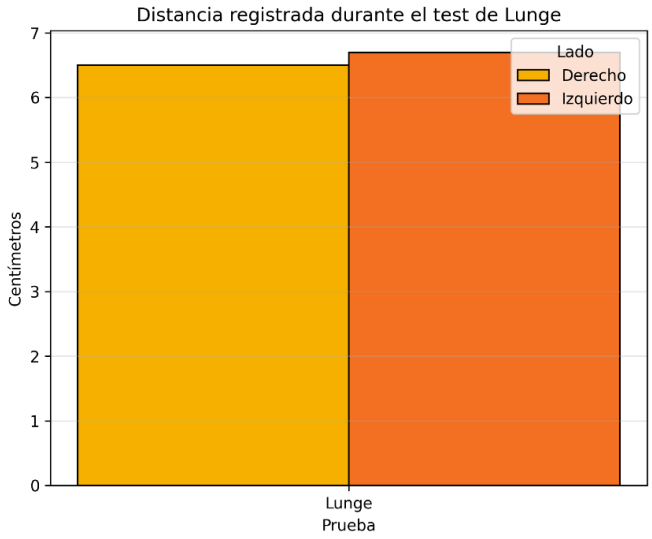


Nota. la tabla presenta los resultados de la prueba de estabilidad articular. Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 4, en el *Lunge Test*, los árbitros alcanzaron un promedio de 6,49 ± 2,74 cm para el tobillo derecho y 6,70 ± 2,55 cm para el izquierdo.

Figura 4.

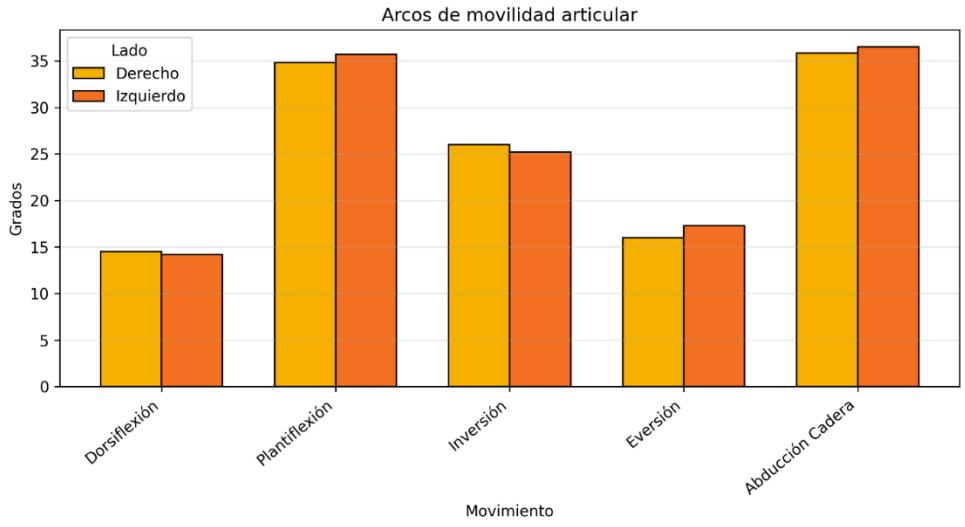
Pruebas de movilidad articular de tobillos.



Los resultados para la dorsiflexión fueron de 14,70 ± 5,12° (derecho) y 14,34 ± 4,92° (izquierdo), indicando rangos funcionales apropiados para la actividad física. Para la plantiflexión, los valores fueron de 34,86 ± 9,99° (derecho) y 35,73 ± 8,99° (izquierdo). En la inversión, se reportaron promedios de 26,16 ± 7,50° (derecho) y 25,25 ± 7,18° (izquierdo), y en la eversión, 16,07 ± 3,64° (derecho) y 17,41 ± 4,30° (izquierdo). Adicionalmente, la evaluación de la abducción de cadera**,** mostro un promedio de 35,70 ± 6,51° para la cadera derecha y 36,59 ± 7,10° para la izquierda. Estos valores reflejan una movilidad adecuada en el plano frontal y una buena apertura de la articulación coxofemoral, lo que resulta clave en acciones como desplazamientos laterales y cambios de dirección propios de la labor arbitral. En conjunto, los resultados muestran que los árbitros evaluados presentan una movilidad articular funcional adecuada tanto en tobillos como en caderas (Ver Figura 5).

imagen arcos de movilidad articular.

Figura 5.
Pruebas de arcos movilidad articular.



Nota. La figura presenta resultados de movilidad articular de tobillos y caderas. Se tomaron diferentes movimientos.

Por otra parte, mediante el análisis estadístico convencional, se encontró un valor significativo de p = 0,023 en relación de la movilidad de tobillo en dorsiflexión con respecto a la presencia de lesión. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas relacionadas a la resistencia muscular de pantorrillas y a la capacidad reactiva de los árbitros evaluados.

En el *Standing Heel-Rise Test*, se obtuvieron promedios de 46,33 ± 8,60 repeticiones para el tobillo derecho y 45,57 ± 9,11 repeticiones para el tobillo izquierdo. Estos valores reflejan una adecuada resistencia muscular local del tríceps sural en ambos miembros, sin diferencias marcadas entre lados.

Como se ilustra en la tabla 3, en la prueba CMJ se evidenció alta variabilidad entre los árbitros: el RSI fue de 1,31 ± 0,59, la altura de salto moderada (17,21 ± 8,17 cm) y tiempos de vuelo y contacto de 367,23 ± 83,31 ms y 323,49 ± 118,74 ms, respectivamente. El *stiffness* muscular promedio fue de 13,62 ± 7,45, indicando en general una adecuada rigidez funcional, aunque con algunos casos de baja capacidad elástica.

Tabla 3.

Resistencia muscular de pantorrillas y prueba de salto Counter Movement Jump (CMJ)

Standing Derecho	Standing Izquierdo	Fuerza Reactiva	Altura de Salto	Tiempo Vuelo	Tiempo Contacto	Stiffness Muscular

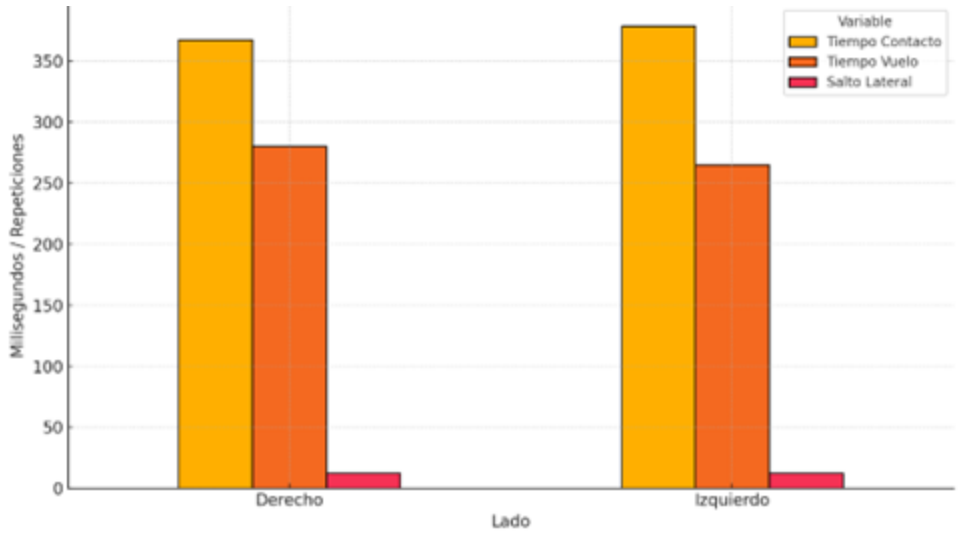
Media ± DS							
	46,3 ± 8,6	45,6 ± 9,1	1,3 ± 0,6	17,2±8,2	367,2 ± 83,3	323,5 ±118,7	13,6 ± 7,4
Mínimo	29,4	22,5	0,5	1,7	208,0	175,0	3,7
Máximo	61,0	67,0	3,4	36,0	7,0	659,0	33,6

Nota. La tabla presenta el resultado de la resistencia muscular de pantorrillas y pruebas d de salto Counter Movement Jump (CMJ).

También, se analizaron variables relacionadas con el rendimiento en pruebas de salto unipodal y lateral, orientadas a evaluar la asimetría, tiempos de contacto y vuelo, y el rendimiento por lado. En la figura 6, se aprecia que, el tiempo de contacto en el salto unipodal fue mayor en el lado izquierdo (378,68 ± 82,08 ms) que en el derecho (367,57 ± 79,88 ms), mientras que el tiempo de vuelo fue ligeramente superior en el lado derecho (280,30 ± 65,53 ms) frente al izquierdo (265,00 ± 63,07 ms). En cuanto a la prueba de salto lateral, los árbitros realizaron en promedio 12,52 ± 3,28 repeticiones con el pie derecho y 12,34 ± 3,74 repeticiones con el pie izquierdo. Esta similitud de rendimiento entre lados reafirma un patrón de carga equilibrado.

Figura 6.

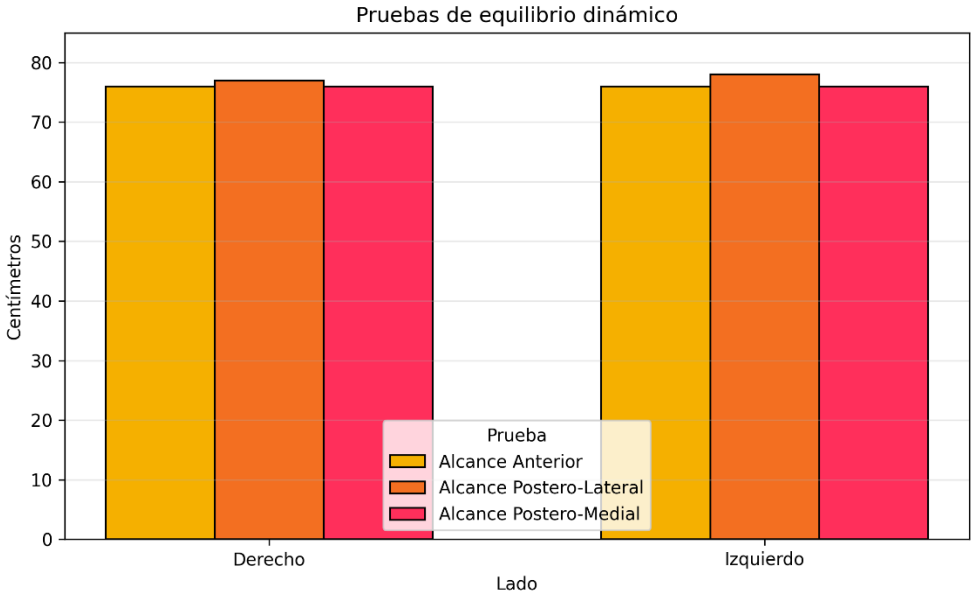
Rendimientos de saltos unipodales y saltos laterales en árbitros de fútbol.



Nota. La tabla presenta el resultado de rendimientos de satos unipodales y saltos laterales en árbitros de futbol. Elaboración propia.

El Y Balance Test evidenció valores de alcance muy similares entre ambas extremidades en las tres direcciones evaluadas: En la figura 6, se aprecia que, anterior (~76 cm), postero-lateral (~77 cm) y postero-medial (~76 cm), con una variabilidad moderada entre los participantes. Además, el tiempo de apoyo unipodal fue consistente entre lados. Estos resultados reflejan una adecuada simetría funcional y un buen control neuromuscular bilateral, sin presencia de desequilibrios relevantes entre extremidades. Sin embargo, la puntuación compuesta promedio de los evaluados fue de 84,88% valor que, de acuerdo con los criterios de referencia del test, los clasifica dentro de un alto riesgo de lesión, sugiriendo limitaciones en el rendimiento funcional global pese a la adecuada simetría bilateral.

Figura 7.
Pruebas de equilibrio dinámico en árbitros de fútbol.

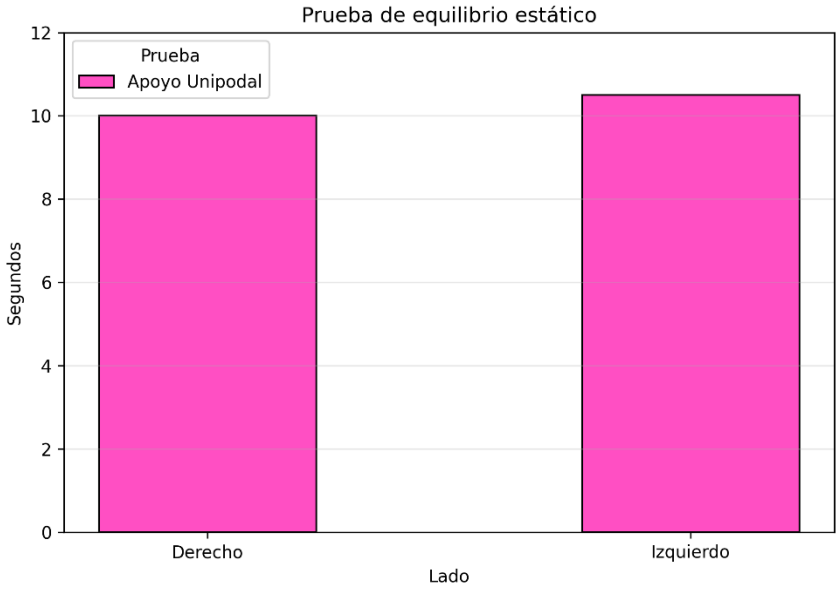


Nota. La figura presenta pruebas de equilibrio dinámico en árbitros de fútbol.

En cuanto a la prueba de apoyo unipodal, se observó un promedio de 10,30 ± 10,64 segundos en el lado derecho y 10,61 ± 11,34 segundos en el izquierdo. Si bien la media sugiere un desempeño adecuado, la alta desviación estándar evidencia una dispersión considerable, lo que podría indicar diferencias importantes en el control postural individual, posiblemente influenciadas por factores como la fatiga, la propiocepción o antecedentes de inestabilidad. Según lo apreciado, estos hallazgos indican que los árbitros evaluados presentan un rendimiento funcional sólido en tareas de estabilidad estatica. Lo anterior se puede evidenciar en la Figura 8.

Va pegada la figura de la prueba estática.

Figura 8.
Pruebas de equilibrio estático en árbitros de fútbol.



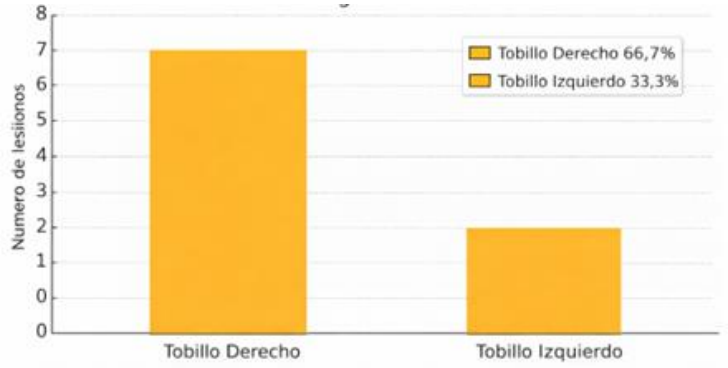
Nota. La figura presenta pruebas de equilibrio estático en árbitros de fútbol. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que, la fuerza muscular es fundamental tanto para la estabilidad estática como en la dinámica, esta se exploró mediante el análisis estadístico convencional, en donde se encontró un valor significativo de p = 0,044 en dorsiflexión y en plantiflexion un valor de p = 0,014 en correlación a la presencia de lesión en los árbitros de la investigación.

A continuación, en la Figura 9, se muestra el diagnóstico de las lesiones presentadas durante el seguimiento que se realizó durante los cuatro meses, donde se registraron un total de 12 lesiones en árbitros, todas clasificadas como esguinces grado I de tobillo, según el diagnostico fisioterapéutico. De las cuales, 8 correspondieron al tobillo derecho lo que representa un 66,7% y 4 al tobillo izquierdo lo que equivale al 33,3% de los árbitros participantes.

Figura 9.

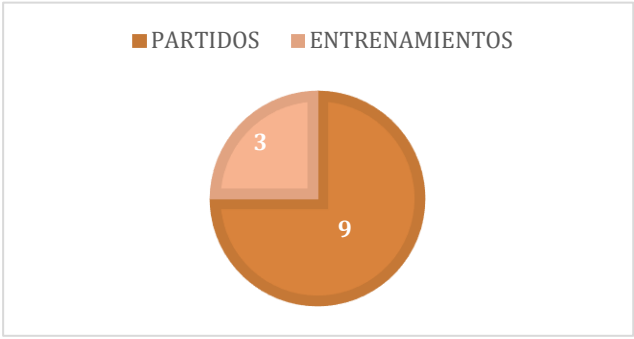
Diagnóstico de lesiones presentadas durante el seguimiento a los árbitros de fútbol.



Nota. La figura presenta el resultado de lesiones presentadas durante el seguimiento a los árbitros de fútbol. Elaboración propia.

De las 12 lesiones reportadas durante el seguimiento, el 75% ocurrieron durante partidos, mientras que solo el 25% de las lesiones se presentaron durante las sesiones de entrenamiento. (Ver Figura 10**).**

Figura 10.
Momentos en los que los árbitros de fútbol presentaron lesión en los tobillos.



Nota. La figura presenta el resultado de los momentos en que los árbitros de fútbol presentan lesión en los tobillos.

Con respecto a la severidad de las lesiones reportadas por los árbitros, como se evidencia en la Figura 11, 8 lesiones (66,7%) fueron clasificadas como leves, según el tiempo de incapacidad reportado, ya que los árbitros permanecieron entre 0 y 7 días por fuera de las prácticas deportivas, Por otra parte, 4 lesiones (33,3%) fueron de carácter moderado, debido a que generaron un tiempo de incapacidad entre 8 y los 21 días. La mayoría de las lesiones sufridas por los árbitros no comprometieron de manera significativa la continuidad de sus actividades deportivas (Ver Figura 11).

Figura 11.

Severidad de las lesiones reportadas por los árbitros de fútbol participantes en el estudio.



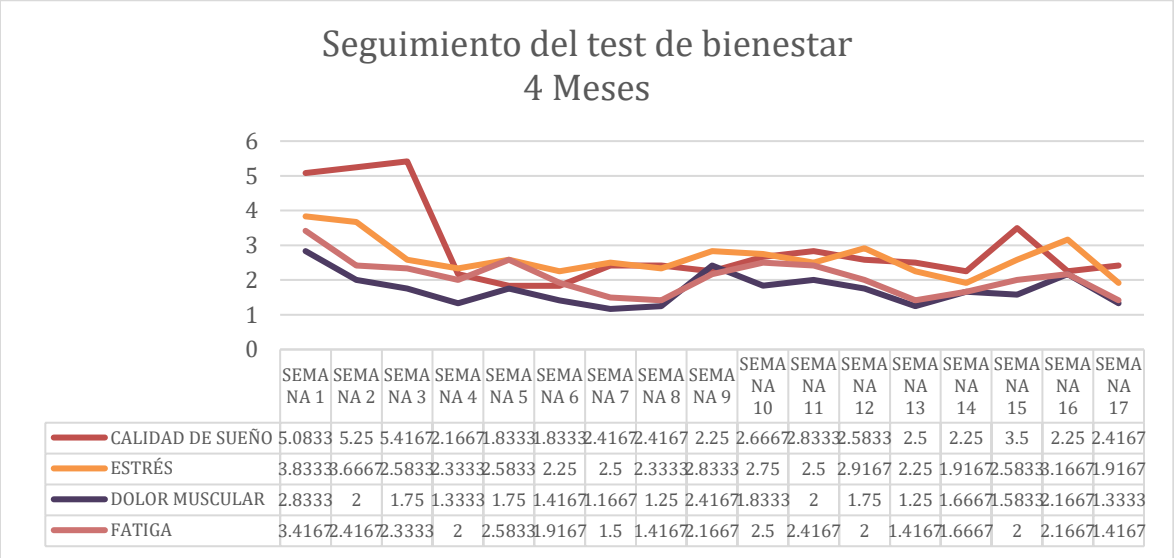
Nota. La tabla presenta el resultado de la severidad de las lesiones reportadas por los árbitros de fútbol participantes del estudio. Elaboración propia.

Durante el seguimiento, la calidad del sueño, en las primeras semanas obtuvo una puntuación máxima de 5,4, la cual mejoro, llegando a 1,8; y luego se estabilizó en un promedio 2,87. El estrés, la fatiga y el dolor muscular mostraron una tendencia descendente desde valores iniciales

más altos hacia niveles bajos, con promedios de 2,59, 2,12 y 1,79, respectivamente, siendo el dolor muscular la variable con menor nivel general (Ver Figura 12).

Figura 12.

Seguimiento del test de bienestar de los árbitros lesionados durante los 4 meses.



	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	SEMANA 12	SEMANA 13	SEMANA 14	SEMANA 15	SEMANA 16	SEMANA 17
CALIDAD DE SUEÑO	5.0833	5.25	5.4167	2.1667	1.8333	1.8333	2.4167	2.4167	2.25	2.6667	2.8333	2.5833	2.5	2.25	3.5	2.25	2.4167
ESTRÉS	3.8333	3.6667	2.5833	2.3333	2.5833	2.25	2.5	2.3333	2.8333	2.75	2.5	2.9167	2.25	1.9167	2.5833	3.1667	1.9167
DOLOR MUSCULAR	2.8333	2	1.75	1.3333	1.75	1.4167	1.1667	1.25	2.4167	1.8333	2	1.75	1.25	1.6667	1.5833	2.1667	1.3333
FATIGA	3.4167	2.4167	2.3333	2	2.5833	1.9167	1.5	1.4167	2.1667	2.5	2.4167	2	1.4167	1.6667	2	2.1667	1.4167

Nota. La figura presenta el resultado del seguimiento al test de bienestar de los árbitros lesionados durante 4 meses. Elaboración propia.

Mediante el análisis estadístico inferencial, se pudo establecer valores significativos correspondientes a la calidad de sueño en la sesión 3 (p = 0,028), estrés durante la sesión 19 (p = 0,040) y fatiga en la sesión 26 (p= 0,045).

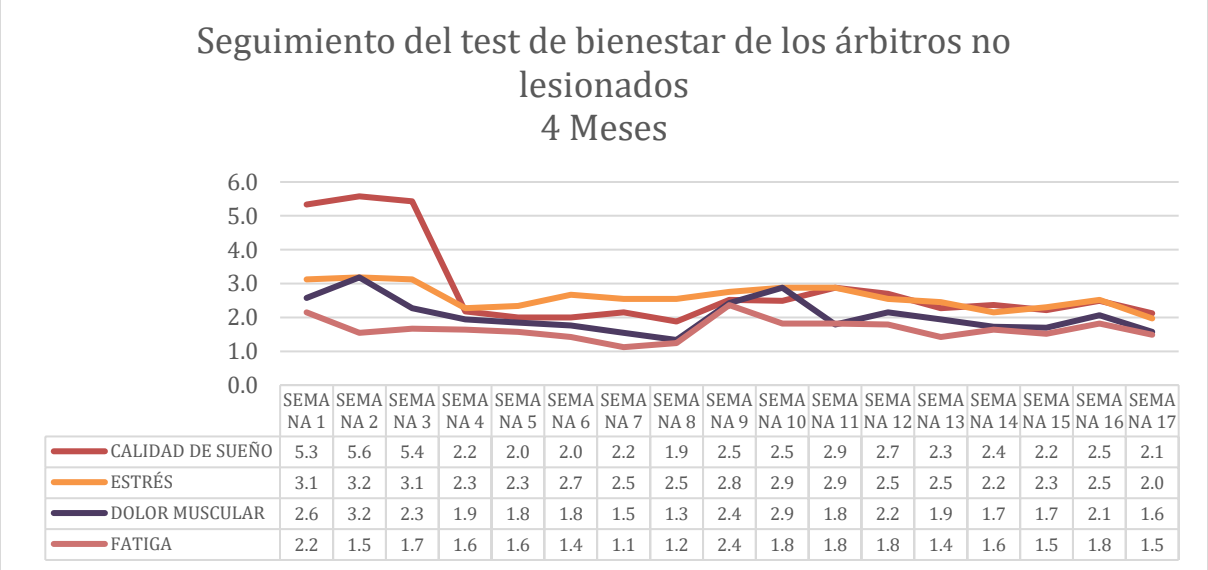
En la Figura 13 se aprecia que la calidad del sueño mostró un inicio elevado durante las primeras tres semanas con valores entre 5,3 y 5,6, lo que indica una percepción positiva. Sin embargo, después de la semana 4 se observa un descenso marcado llegando a puntuaciones de

2,2 la cual se mantuvo por varias semanas, estabilizándose posteriormente en valores intermedios entre 2,2 y 2,9.

El estrés se mantuvo relativamente estable, con valores moderados durante las primeras semanas (3,1–3,2) y una tendencia a la disminución hacia las semanas intermedias y finales, donde se percibe un valor mínimo de 2 en la semana 17. En cuanto al dolor muscular, se evidenció una disminución progresiva desde la semana 2 donde su valor fue de 3,2 hasta alcanzar valores mínimos de 1,3 en la semana 8, con picos puntuales en semanas posteriores como se puede observar en la semana 10 donde alcanzó un valor de 2,9. Por último, la fatiga muscular muestra valores bajos de manera constante, comenzando en 2,2 en la semana 1 y disminuyendo hasta 1,1 en la semana 7, con ligeras oscilaciones posteriormente.

Figura 13.

Seguimiento del test de bienestar de los árbitros no lesionados durante 4 meses.

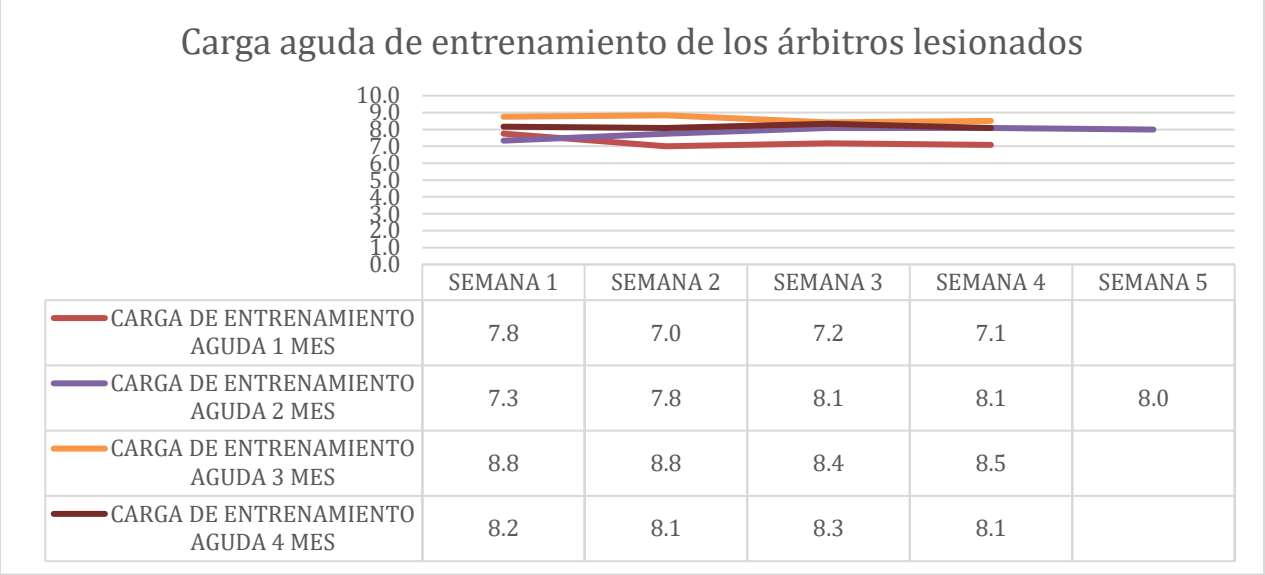


	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	SEMANA 12	SEMANA 13	SEMANA 14	SEMANA 15	SEMANA 16	SEMANA 17
CALIDAD DE SUEÑO	5.3	5.6	5.4	2.2	2.0	2.0	2.2	1.9	2.5	2.5	2.9	2.7	2.3	2.4	2.2	2.5	2.1
ESTRÉS	3.1	3.2	3.1	2.3	2.3	2.7	2.5	2.5	2.8	2.9	2.9	2.5	2.5	2.2	2.3	2.5	2.0
DOLOR MUSCULAR	2.6	3.2	2.3	1.9	1.8	1.8	1.5	1.3	2.4	2.9	1.8	2.2	1.9	1.7	1.7	2.1	1.6
FATIGA	2.2	1.5	1.7	1.6	1.6	1.4	1.1	1.2	2.4	1.8	1.8	1.8	1.4	1.6	1.5	1.8	1.5

Nota. La figura presenta los resultados al seguimiento del test de bienestar de los árbitros no lesionados durante 4 meses. Elaboración propia.

De igual manera, las cargas semanales fueron moderadas en el primer mes (≈7,0–7,8), aumentaron en el segundo hasta valores cercanos a 8,0–8,1, alcanzaron su punto más alto en el tercer mes (hasta 8,8) y en el cuarto mes se mantuvieron estables con ligeras fluctuaciones (≈8,1–8,3). En conjunto, la carga global se sostuvo en niveles altos durante la mayor parte del periodo (Ver Figura 14).

Figura 14.
Carga aguda de entrenamiento de los árbitros lesionados



	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 1 MES	7.8	7.0	7.2	7.1	
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 2 MES	7.3	7.8	8.1	8.1	8.0
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 3 MES	8.8	8.8	8.4	8.5	
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 4 MES	8.2	8.1	8.3	8.1	

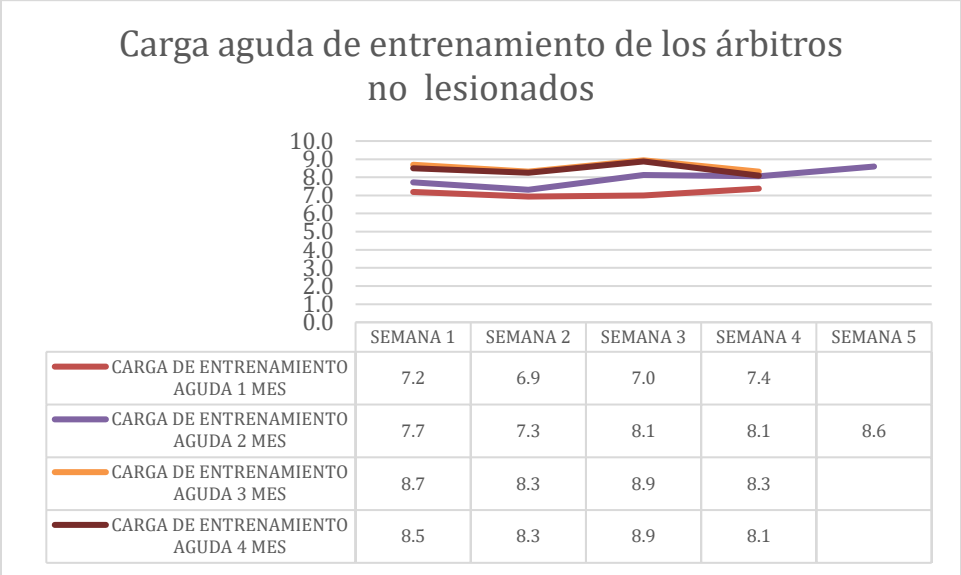
Nota. La figura presenta carga aguda de entrenamiento de los árbitros lesionados. Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 15, la carga aguda de entrenamiento inició en un rango moderado en el primer mes (≈6,9–7,4), aumentó progresivamente en el segundo mes hasta alcanzar

valores altos (hasta 8,6), y se mantuvo elevada y relativamente estable en el tercer y cuarto mes, con picos cercanos a 8,9 y ligeras fluctuaciones semanales.

Figura 15.

Carga aguda de entrenamiento de los árbitros no lesionados



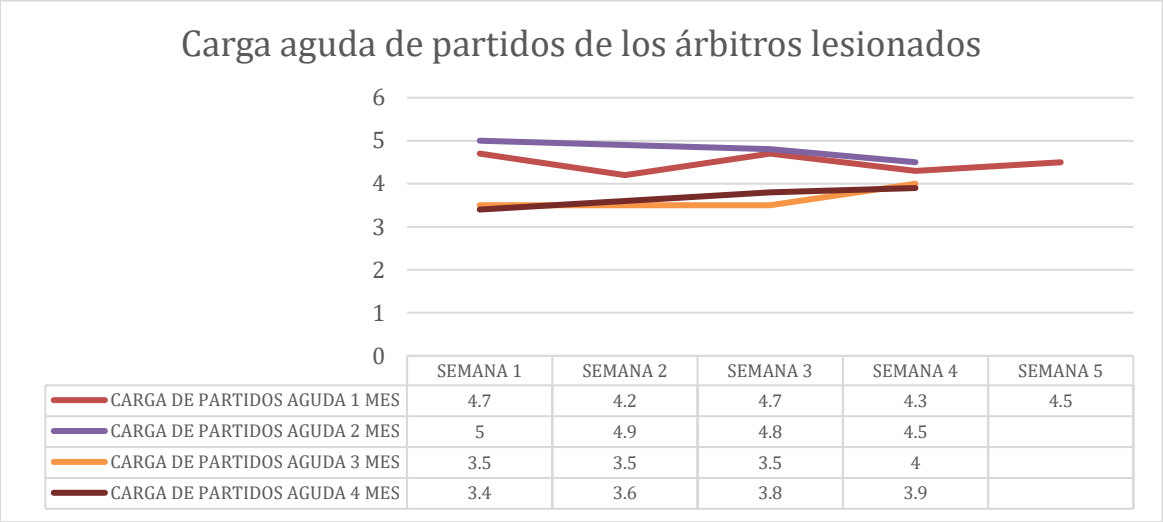
	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 1 MES	7.2	6.9	7.0	7.4	
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 2 MES	7.7	7.3	8.1	8.1	8.6
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 3 MES	8.7	8.3	8.9	8.3	
CARGA DE ENTRENAMIENTO AGUDA 4 MES	8.5	8.3	8.9	8.1	

Nota. La figura presenta resultados de la carga aguda de entrenamiento de los árbitros no lesionados. Elaboración propia.

Como se ilustra en la Figura 16, en los árbitros lesionados, la carga aguda fue alta e inestable en el primer mes (≈4,2–4,7) y alcanzó sus valores más elevados en el segundo mes (hasta 5,0). En el tercer mes se estabilizó en niveles más bajos (≈3,5–4,0), y en el cuarto mes mostró un leve incremento progresivo (≈3,4–3,9).

Figura 16.

Carga aguda de partidos de los árbitros lesionados



	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 1 MES	4.7	4.2	4.7	4.3	4.5
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 2 MES	5	4.9	4.8	4.5	
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 3 MES	3.5	3.5	3.5	4	
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 4 MES	3.4	3.6	3.8	3.9	

Nota. La figura presenta resultado de Carga aguda de partidos de los árbitros lesionados. Elaboración propia.

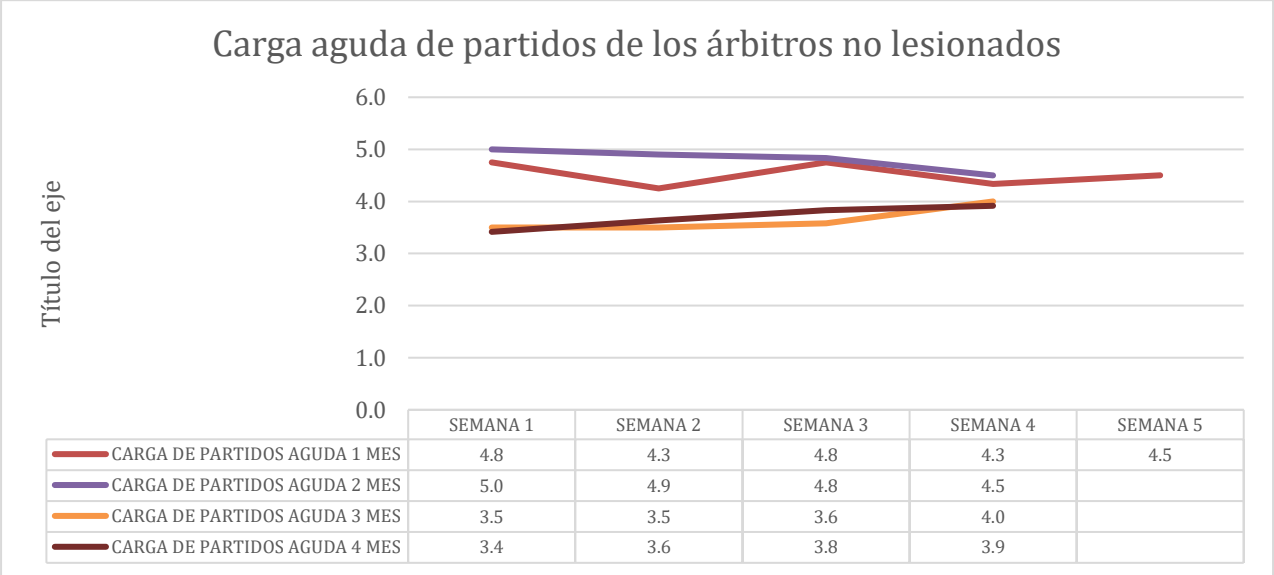
Con el análisis estadístico convencional, se observó un valor significativo en la variable de número de partidos dirigidos durante la semana inmediatamente anterior en la sesión 23 con un valor de p = 0,017 con relación a las lesiones presentadas. Asimismo, se obtuvo un valor de p= 0,007 en la variable relacionada con el cansancio después de los partidos en la sesión 25.

Como se ilustra en la Figura 17 en los árbitros sin lesión, la carga aguda de partidos fue moderada en el primer mes (≈4,2–4,7), ligeramente mayor en el segundo (hasta 5,0), disminuyó

en el tercer mes (≈3,5–4,0) y volvió a incrementarse de forma progresiva en el cuarto mes (≈3,4–3,9).

Figura 17.

Carga aguda de partidos de los árbitros no lesionados



	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 1 MES	4.8	4.3	4.8	4.3	4.5
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 2 MES	5.0	4.9	4.8	4.5	
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 3 MES	3.5	3.5	3.6	4.0	
CARGA DE PARTIDOS AGUDA 4 MES	3.4	3.6	3.8	3.9	

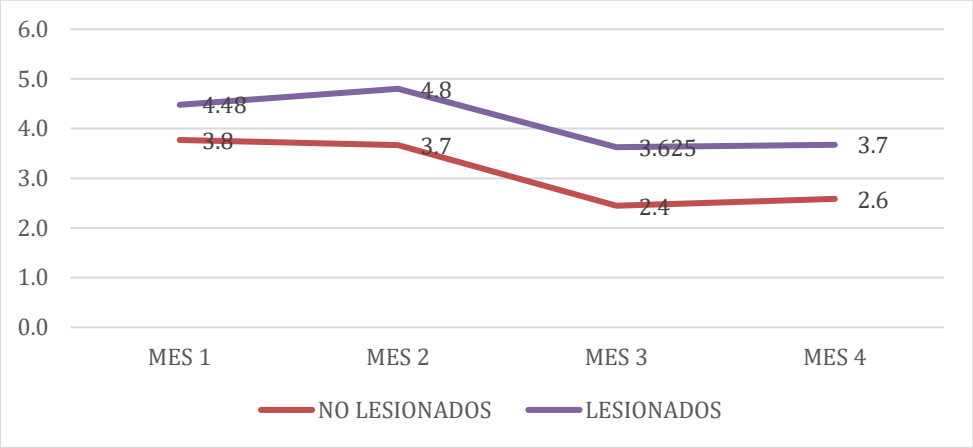
Nota. La figura presenta el resultado de la carga aguda de partidos de los árbitros no lesionados. Elaboración propia.

En la Figura 18, se evidencia que, en el primer mes, los árbitros lesionados acumularon una carga crónica de 4,48, mientras que los no lesionados registraron un valor de 3,8. Esta diferencia se extendió en el segundo mes, con una carga crónica de 4,8 en lesionados frente a 3,7 en no lesionados. En el tercer mes, aunque ambos grupos mostraron una reducción general en la carga crónica, los lesionados continuaron con valores superiores (3,6 vs 2,4). Finalmente, en el

cuarto mes, la diferencia se mantuvo, aunque con menor volumen 3,7 en lesionados vs 2,6 en no lesionados.

Figura 18.

Comparación de las cargas crónicas de partidos durante los 4 meses de seguimiento.



Nota. La figura presenta el resultado de la comparación de las cargas crónicas de partidos durante los 4 meses de seguimiento. Elaboración propia.

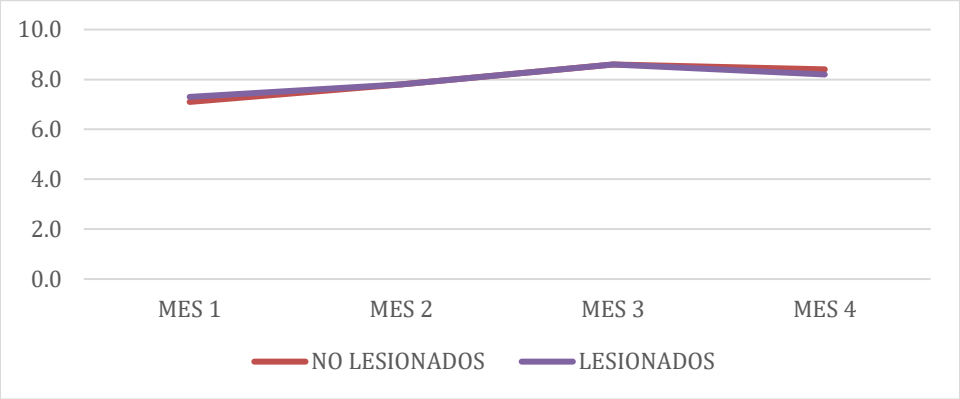
De igual manera, se logró evidenciar un comportamiento muy similar entre los árbitros lesionados y no lesionados durante el seguimiento. Sin embargo, se pudieron observaron diferencias puntuales con respeto a la carga crónica. Durante el primer mes, los árbitros lesionados reportaron una carga crónica promedio de 7,3, ligeramente superior a la de los no lesionados que fue de 7,1.

En el segundo mes, ambos grupos mostraron una carga crónica idéntica de 7,8, lo que indica una homogeneidad en la percepción del esfuerzo acumulado. Sin embargo, en el tercer

mes, se registró un incremento notorio en ambos grupos, alcanzando un valor de 8,6. Para el cuarto mes, se observó una ligera reducción de la carga crónica en ambos grupos, con valores de 8,4 para los no lesionados y 8,2 para los lesionados, la diferencia es mínima entre los lesionados y no lesionados (Ver Figura 19).

Figura 19.

Comparación de las cargas crónicas de entrenamientos de los árbitros durante los 4 meses de seguimiento.

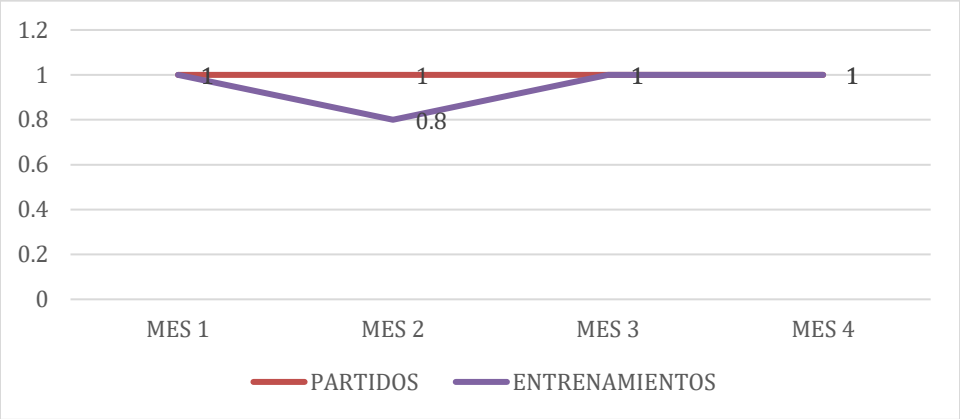


Nota. La figura presenta el resultado de la comparación de las cargas crónicas de entrenamientos de los árbitros durante los 4 meses de seguimiento. Elaboración propia.

Al realizar el seguimiento a la carga crónica/aguda de los partidos, se observó que permaneció constante en un valor de 1,0 a lo largo de los cuatro meses de seguimiento. Por otra parte, en los entrenamientos, fue también de 1,0 en el primer, tercer y cuarto mes. Sin embargo, en el mes 2, se registró un descenso a 0,8, lo que puede interpretarse como una ligera disminución en la carga aguda semanal, en comparación con la carga crónica previa (Ver Figura 20).

Figura 20.

Carga crónica/aguda durante los 4 meses de seguimiento a los árbitros.



Nota. La figura presenta el resultado de la carga crónica/aguda durante los 4 meses de seguimiento a los árbitros. Elaboración propia.

Respecto a los hallazgos significativos se evidenció una asociación significativa entre la movilidad en dorsiflexión del tobillo y la presencia de lesión (p = 0,023), lo que indica que limitaciones en este rango de movimiento pueden incrementar el riesgo lesivo en árbitros de fútbol. Lo anterior sugiere que la dorsiflexión cumple un papel clave en la mecánica de desplazamiento, especialmente en acciones como de frenado, cambios de dirección y desaceleración. También se apreció que las variables relacionadas con la fuerza muscular mostraron asociación significativa con la lesión, específicamente en dorsiflexión (p = 0,044) y plantiflexión (p = 0,014). Este resultado se asocia a déficits en la capacidad de producción de fuerza del complejo tobillo-pie lo que puede comprometer la estabilidad dinámica y aumentar la susceptibilidad a esguinces, particularmente en contextos de alta exigencia funcional.

Ahora bien, en cuanto a relación con las variables de bienestar, se identificaron asociaciones significativas en dimensiones como la calidad del sueño, el estrés y la fatiga, lo que sugiere que el estado de recuperación del árbitro influye en el riesgo de lesión. Las variables de carga mostraron una relación relevante con la aparición de lesiones, destacándose el número de partidos dirigidos ($p = 0,017$) y el nivel de cansancio posterior a los mismos ($p = 0,007$). Esto sugiere que la exposición competitiva y la fatiga acumulada constituyen factores determinantes en la incidencia de lesiones, especialmente considerando que la mayoría de estas ocurrieron durante los partidos.

5.3 Algoritmo basado en inteligencia artificial para analizar y procesar los datos capturados para detectar tendencias, agrupamiento o patrones que indiquen el riesgo de lesión de tobillo.

Por otra parte, con el análisis realizado con la ayuda de la inteligencia artificial, se logró definir tres clústeres, estos representan patrones descriptivos y no implican predicción directa del riesgo de lesión. Cada uno de ellos representa un grupo con determinado perfil característico en cuanto se trata de composición corporal, rendimiento funcional y percepción de fatiga. Es importante aclarar que estos grupos representan patrones descriptivos basados en similitudes entre variables, por lo cual no implican por sí mismo una clasificación directa del riesgo de lesión sino un análisis estadístico adicional.

Clúster 0: Perfil funcional favorable

- Peso intermedio

- Buena masa muscular
- Bajo porcentaje de grasa corporal
- Mejor desempeño funcional
- Baja fatiga percibida

Este clúster pertenece a un grupo con características físicas y funcionales más optimas. Clúster 1: Perfil de carga moderada.

- Mayor porcentaje de grasa corporal.
- Mayor fatiga percibida.
- Variabilidad en el tiempo de apoyo
- Condición intermedia en variables funcionales.

Este clúster representa un grupo con condiciones mixtas, posiblemente en estados de carga media.

Clúster 2: Perfil con menos desempeño relativo.

- Características intermedias en composición corporal.
- Mayor percepción de fatiga en comparación con el clúster 0
- Menor rendimiento funcional relativo

Este clúster representa un grupo con condiciones que podrían estar asociadas a menor rendimiento; sin embargo, no se puede afirmar directamente un mayor riesgo de lesión sin pruebas estadísticas adicionales. Adicionalmente, se caracterizaron los clústeres considerando variables de bienestar, carga de entrenamiento y percepción de fatiga:

Clúster 0 – “Mejor estado de recuperación”

- Alta calidad de sueño
- Bajo estrés y fatiga
- Dolor muscular leve
- Carga estable
- Bajo cansancio

Este clúster sugiere un estado adecuado de recuperación y adaptación.

Clúster 1 – “Estado intermedio de carga”

- Sueño variable
- Estrés y fatiga moderados
- Carga media-alta.
- Presencia ocasional de molestias.

Este clúster indica un estado de carga moderada con posibles signos de fatiga acumulada.

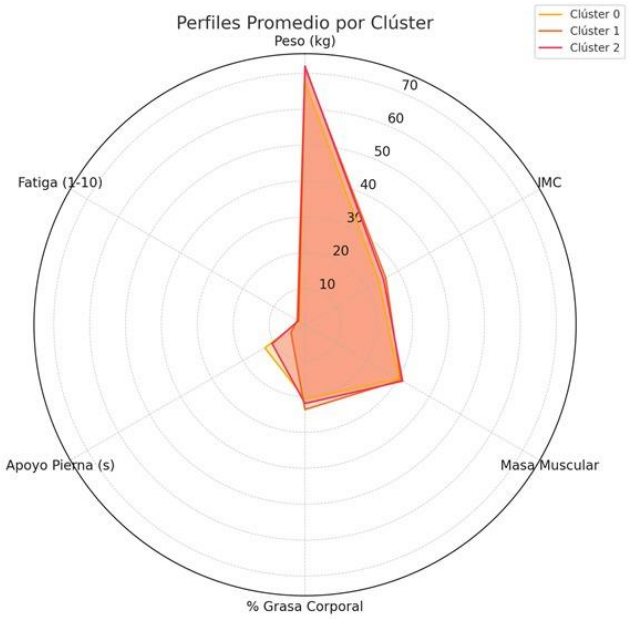
Clúster 2 – “Mayor percepción de fatiga”

- Sueño alterado
- Alta fatiga y estrés
- Dolor muscular frecuente
- Mayor cansancio

Este clúster presenta un grupo con mayores niveles de fatiga percibida, lo que podría requerir ajustes en la carga; sin embargo, no se establece de manera concluyente una mayor incidencia de lesión sin análisis inferencial. A continuación, se presenta un gráfico radar que compara visualmente los perfiles promedio de cada clúster (Ver Figura 21).

Figura 21.

Perfiles promedio por clúster de los árbitros de fútbol del Cauca.



Nota. La figura presenta el perfil de promedio por clúster de los árbitros de fútbol del Cauca. Elaboración propia.

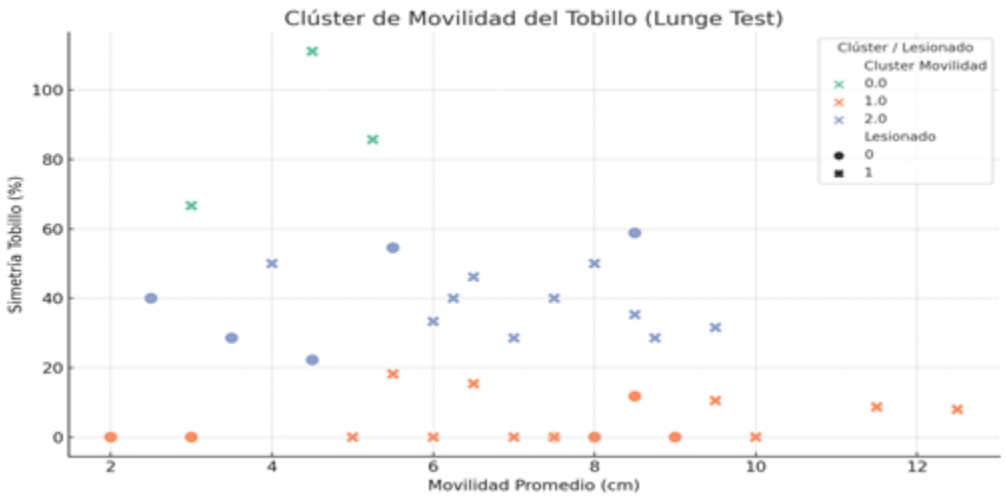
También se realizó un análisis comparativo de clúster, en donde se tuvo en consideración el perfil deportivo, la composición corporal y la movilidad articular de tobillo. La clasificación permitió establecer perfiles de riesgo de lesión en los árbitros. Los resultados indican que el

Clúster 0, se caracteriza por la alta experiencia deportiva, la buena composición corporal y una adecuada movilidad articular, en este clúster se agrupan principalmente a árbitros no lesionados. En contraste, el Clúster 1 presenta una menor experiencia arbitral, mayor grasa corporal, menor masa muscular y mayor asimetría funcional, siendo el grupo con más lesionados. El Clúster 2 representa un perfil intermedio con distribución mixta de lesiones.

Los clústeres enseñan tendencias claras como lo son: los individuos con alta asimetría o baja movilidad tienden a agruparse, y muchos de ellos coinciden con la categoría de lesionados teniendo en cuenta la prueba de Lunge Test. En este mismo análisis se evidenció que los resultados mostrados en el clúster 2 presentan la mayor asimetría en la dirección anterior y la simetría total más baja, por lo que se sugiere un mayor riesgo de lesión (Ver Figura 22).

Figura 22.

Clúster de movilidad de tobillo mediante lunge test (N: 30)

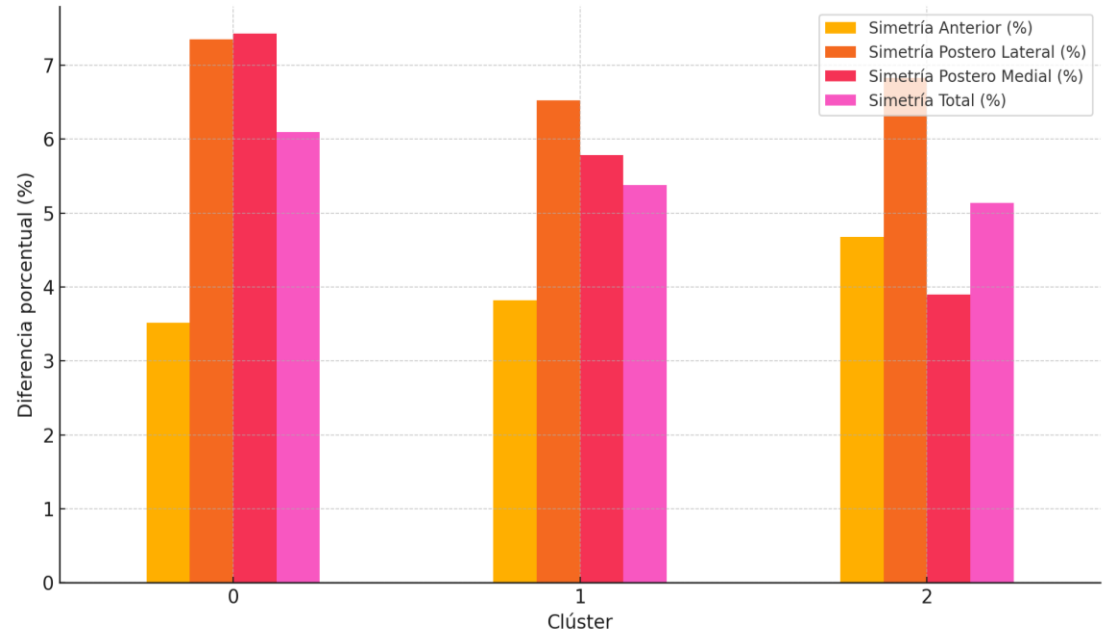


Nota. La figura presenta resultados del clúster de movilidad de tobillo mediante lunge test (N: 30). Elaboración propia.

En el análisis comparativo de clúster de funcionalidad y de estabilidad dinámica, en donde se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos de la prueba de Y Balance Test, arrojo el gráfico donde se muestra la distribución de los individuos según movilidad promedio y simetría, coloreados por clúster y diferenciando lesionados y no lesionados (Ver Figura 23).

Figura 23.

Comparativo de simetría del Y-Balance Test por clúster de los árbitros de fútbol.

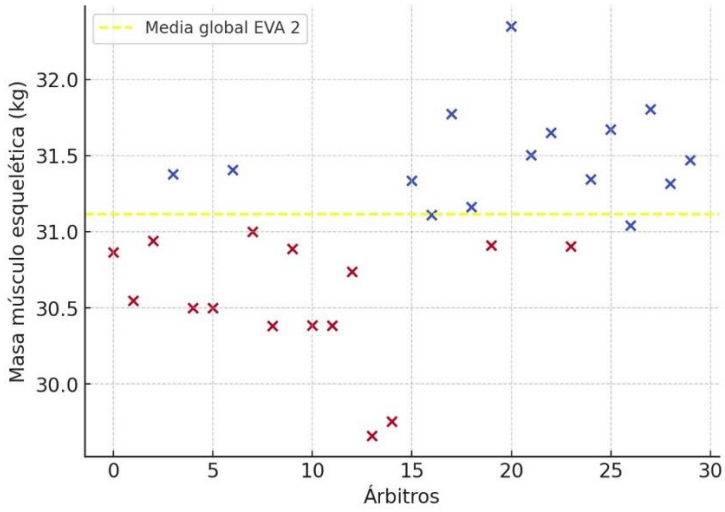


Nota. La figura presenta un comparativo de simetría del Y-Balance Test por clúster de los árbitros de fútbol. Elaboración propia.

A continuación, se muestra que los árbitros que no presentaron lesiones durante el seguimiento presentan un promedio mayor de masa musculoesquelética (31,42 kg) si lo comparamos con los árbitros que presentaron algún tipo de lesión, los cuales presentaron un promedio de 30,62 kg. (Ver Figura 24).

Figura 24.

Clúster de comparación de masa musculo esquelética entre árbitros lesionados y no lesionados

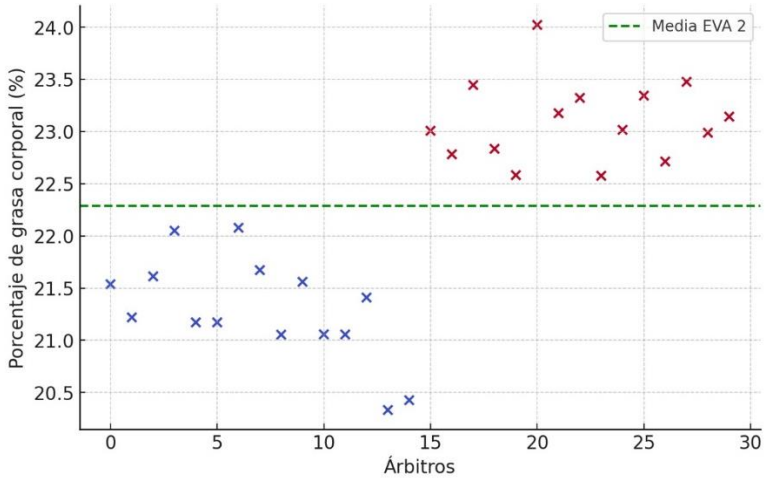


Nota. La figura presenta el resultado del clúster de comparación de masa musculo esquelética entre árbitros lesionados y no lesionados. Elaboración propia.

En la figura 25, se expresa la comparación entre el porcentaje de grasa corporal entre los árbitros lesionados y no lesionados, el cual muestra que, en promedio, los árbitros lesionados presentan un 21,29% de grasa corporal, mientras que los árbitros no lesionados registran un valor más alto, con 23,10%.

Figura 25.

Clúster de comparación de porcentaje de grasa corporal entre árbitros lesionados y no lesionados



Nota. La figura presenta el resultado del clúster de comparación de porcentaje de grasa corporal entre árbitros lesionados y no lesionados.

Finalmente, se realizó un análisis predictivo de lesiones, el cual complementa el análisis de clúster con la ayuda de la aplicación de modelos de predicción que están basados en las variables antropométricas y funcionales. Para esto se evaluaron tres algoritmos: Árbol de Decisión, Regresión Logística y Random Forest, con el fin de poder predecir el estado de lesión de los árbitros.

1. Árbol de Decisión

El Árbol de Decisión mostró un desempeño perfecto en el conjunto de prueba, clasificando correctamente tanto a lesionados como a no lesionados. Aunque estos resultados son alentadores

2. Modelos Avanzados: Regresión Logística y Random Forest

Los modelos de Regresión Logística y Random Forest permitieron identificar las variables más relevantes para la predicción de lesiones.

Este análisis reveló que indicadores como la masa corporal, el IMC, las pruebas funcionales de apoyo y la percepción de fatiga son claves para anticipar el riesgo de lesión. Esto proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas en procesos de entrenamiento y prevención de lesiones. A continuación, en la Figura 26, se presentan las variables con mayor peso en ambos modelos

Figura 26.
Variables más importantes para la predicción de lesiones en árbitros de fútbol



Nota. La figura presenta las variables más importantes para la predicción de lesiones en árbitros de fútbol. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evaluó el rendimiento de tres modelos de clasificación (regresión logística, árbol de decisión y Random Forest) para la predicción de lesiones de tobillo en árbitros de fútbol.

El modelo Random Forest presentó el mejor desempeño global, en términos de exactitud, alcanzando un (*accuracy)* de 0.82, lo que indica una adecuada capacidad de clasificación general. Asimismo, mostro el valor más alto de *recall* (0.75), lo que evidencia una mejor capacidad para identificar correctamente a los árbitros que presentaron lesión. Sin embargo, el modelo presentó una precisión moderada (0.64), lo que indica la presencia de falsos positivos en la clasificación. Esto sugiere que, aunque el modelo es eficaz detectando casos de lesión, también tiende a clasificar como lesionados a algunos árbitros que no presentaron lesión.

El *F1-score* (0.69) refleja un equilibrio aceptable entre precisión y *recall*, lo cual es relevante considerando el desbalance de clases presente en la muestra (12 lesionados vs 32 no lesionados). En comparación, el modelo de árbol de decisión presentó un rendimiento competitivo, con valores relativamente equilibrados en todas las métricas. No obstante, se debe interpretar con precaución el resultado de clasificación perfecta reportado inicialmente, ya que puede indicar un posible sobreajuste del modelo, especialmente considerando el tamaño reducido de la muestra.

Por su parte, la regresión logística evidenció un desempeño inferior en comparación con los otros modelos, particularmente en el *recal*l (0.58), lo que sugiere una menor capacidad para identificar correctamente los casos de lesión. (Tabla 4)

Tabla 4.

Desempeño de los modelos de clasificación para la predicción de lesiones de tobillo

MODELO	ACCURACY	PRECISION	RECALL	F1-SCORE
Regresión logística	0.75	0.67	0.58	0.62
Árbol de decisión	0.79	0.71	0.67	0.69
Random Forest	0.82	0.64	0.75	0.69

Nota. Accuracy: proporción total de clasificaciones correctas. Precisión: proporción de predicciones positivas correctas. *Recall:* capacidad del modelo para identificar correctamente los casos de lesión. F1-score: media armónica entre precisión y *recall.*

Considerando que el modelo Random Forest presentó el mejor rendimiento predictivo entre los algoritmos evaluados, se procedió a analizar de manera más específica su comportamiento mediante la matriz de confusión. Esta herramienta permitió examinar la capacidad del modelo para clasificar correctamente los casos positivos y falsos negativos en la predicción de lesiones de tobillo (Ver Tabla 5).

Tabla 5.

Matriz de confusión del modelo Random Forest

	PREDICCION LESION	PREDICCION NO LESION
LESION REAL	9	3
NO LESION REAL	5	27

Nota. La tabla presenta la matriz de confusión del modelo Random Forest. Elaboración propia.

La matriz de confusión del modelo Random Forest permitió evaluar de manera detallada el desempeño del modelo en la clasificación de los árbitros según la presencia de lesión. Se observó que el modelo identificó correctamente 9 de los 12 casos de lesión (verdaderos positivos), mientras que 3 casos fueron clasificados como no lesionados (falsos negativos). En

cuanto a los árbitros sin lesión, 27 fueron correctamente clasificados (verdaderos negativos) y 5 fueron clasificados incorrectamente como lesionados (falsos positivos).

Estos resultados indican que el modelo presenta una adecuada capacidad para identificar casos reales de lesión, aunque con cierta tendencia a sobreestimar el riesgo en algunos individuos (Ver Tabla 6).

Tabla 6.

Matriz de confusión del modelo Random Forest para la predicción de lesiones de tobillo

	PREDICCION LESION	**PREDICCION NO LESION**	**TOTAL**
LESION REAL	9	3	12
NO LESION REAL	5	27	32
TOTAL	14	30	44

Nota: TP (Verdaderos positivos) = 9. FN (Falsos negativos) = 3. FP (Falsos positivos) = 5. TN (Verdaderos negativos) = 27

6 Discusión

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo predictivo de lesiones de tobillo basado en inteligencia artificial, por lo que se analizó los factores de riesgo intrínsecos modificables, las variables de carga y la incidencia de lesiones de tobillo en los árbitros de fútbol del departamento del Cauca, con la intención de determinar los factores asociados en la aparición de lesiones en la articulación del tobillo. Según los resultados encontrados se apreció que la aparición de lesiones de tobillo en árbitros de fútbol no responde a un único factor aislado, sino a la interacción de múltiples componentes. Se encontró que las variables relacionadas con la carga de entrenamiento y competencia, el estado de bienestar subjetivo y las capacidades neuromusculares se asocian con la presencia de lesión. Lo anterior, orientó a deducir que el riesgo lesivo en esta población está condicionado tanto por la exposición acumulada a las demandas del arbitraje como por la capacidad del organismo para tolerarlas y recuperarse adecuadamente.

Para este estudio la muestra se conformó por 44 árbitros del Cauca, con predominio masculino, acorde con lo reportado por Serrano-Durá (2022), aunque se reconoce un aumento progresivo de la participación femenina. La edad promedio fue de 29 años, con un rango amplio (19–56 años), lo que mostró diversidad en experiencia y coincide con estudios previos que sitúan a esta población entre los 18 y 34 años (Serrano, 2022; Vidal, 2019). El IMC fue similar entre sexos y se ubicó en rango de sobrepeso; sin embargo, en contextos deportivos este indicador puede no reflejar adecuadamente la composición corporal debido a la mayor masa muscular (W ebb et al., 2024), esto también se ha identificado en otros estudios (Espin, 2021). La experiencia

arbitral varió con una media de 6,05 años, similar a lo que se indica en el estudio de Serrano, (2022).

En cuanto a la carga, los árbitros dirigieron en promedio 3,48 partidos por semana, lo que implica alta exposición a demandas físicas y cognitivas, pudiendo comprometer la recuperación y aumentar el riesgo de lesión (Pérez-Castillo et al., 2023). Además, el tiempo de entrenamiento fue elevado (≈105 minutos por sesión), lo que evidencia un alto nivel de preparación, pero también resalta la necesidad de controlar la carga total para evitar incrementos en el riesgo lesivo. Durante el tiempo que se realizó el seguimiento, se observó que los árbitros que indicaron lesiones fueron quienes presentaron mayores valores en la carga crónica de partidos. Pero si se tiene en cuenta la relación entre la carga crónica vs la aguda de partidos, se pudo evidenciar que los árbitros que mostraron lesiones mantuvieron constante su valor, lo que sugiere que puede existir una fatiga residual progresiva que los llevará a la lesión, aunque esta relación no mostro valores extremos (Impellizzeri et al., 2020).

Con relación a la carga de entrenamiento y competencia, los resultados de este estudio mostraron que el riesgo de lesión no está determinado exclusivamente por incrementos abruptos, sino por la exposición sostenida a niveles elevados de carga a lo largo del tiempo. Este comportamiento es consistente con el concepto de carga crónica, entendido como la acumulación progresiva de esfuerzos sin periodos suficientes de recuperación, lo que puede derivar en estados de fatiga residual. Según lo encontrado en el presente estudio los árbitros lesionados presentaron cargas elevadas y relativamente constantes durante en varios periodos, lo que puede limitar los procesos de recuperación fisiológica y favorecido un deterioro progresivo de la función

neuromuscular. Según los estudios la carga no solo debe valorarse en términos de magnitud semanal, sino como un fenómeno acumulativo que, al no ser adecuadamente gestionado, incrementa la susceptibilidad a la lesión (Impellizzeri et al., 2020; Rico-González et al., 2024).

El modelo de relación entre carga aguda/crónica en los últimos años, ha estado expuesta a múltiples revisiones de manera crítica, puesto que se ha sugerido que, la carga acumulada que se mantiene por tiempo prolongado puede ser un factor de riesgo, así no existan cambios abruptos en los volúmenes o intensidades (Impellizzeri et al., 2020; Rico-González et al., 2024). Adicionalmente a esto, es importante mencionar que, en investigaciones actuales en el fútbol profesional, se ha observado que, durante las temporadas con mayor número de partidos, están vinculadas a mayor incidencia de lesiones, y aún más cuando los deportistas no tienen tiempo para una recuperación adecuada (Page et al., 2023).

En el campo del arbitraje, las lesiones de miembros inferiores presentan una alta prevalencia, en especial en la articulación del tobillo, como los manifestó (Vidal Lamela, 2019; Vidal Lamela, 2020). De igual manera, Cipriano et al. (2019) refiere que las exigencias físicas de los árbitros de fútbol son altas, ya que estos deben realizar desplazamientos intermitentes que requieren de altas intensidades durante los partidos, las cuales son similares a los jugadores, lo cual respalda lo encontrado, al describir que el 75% de las lesiones reportadas fueron durante los partidos.

Investigaciones han indicado que una preparación física insuficiente y la suma de partidos están vinculados a presentar un mayor riesgo de lesión en árbitros, (Paredes Barros & Torres Sailema, 2018). Teniendo en cuenta, lo hallado en el presente estudio, se podría reafirmar

esto, ya que se encontró que algunos árbitros solo entrenaban dos veces por semana y que en ocasiones podrían llegar a dirigir hasta 7 partidos por semana, lo que los llevaría a no tener un tiempo de recuperación suficiente.

Desde el punto de vista fisiológico, la literatura sugiere que, la exposición mantenida a cargas crónicas puede generar estados de fatiga acumulativa que van a afectar directamente estructuras capsuloligamentarias, como lo son los componentes neuromusculares de las articulaciones (Gabbett, 2020). Por otra parte, a nivel tisular la presencia constante de esfuerzos sub máximos producirán micro daños en las fibras de colágeno ligamentario, lo que podría favorecer procesos inflamatorios, los cuales pueden alterar las propiedades viscoelásticas de los ligamentos, (Magnusson, & Kjaer, 2019) lo que finalmente conllevaría a presentar un déficit en la capacidad de resistencia ante situaciones inesperadas.

Adicionalmente, a nivel neuromuscular, la presencia de fatiga crónica va a provocar alteraciones en los mecanismos de control sensoriomotor y propioceptivo, lo que generaría una reducción de la sensibilidad de los mecanorreceptores articulares y musculares (Paillard, 2021), lo cual ha sido extensamente asociado al deterioro de la exactitud propioceptiva y del control motor después de estados de fatiga (Azevedo et al., 2024). Lo que produciría a una alteración en la trasmisión de la información eferente hacia el sistema nervioso central (Pethick & Tallent, 2022). Lo que conllevaría a presentar una disminución de la capacidad de activación muscular y de la alteración del control postural.

Sumado a lo anterior, la fatiga neuromuscular también va a afectar la capacidad que tiene los músculos de proporcionar fuerza de forma rápida y coordinada, lo que provoca una alteración

del ciclo de estiramiento – acortamiento y limita la capacidad de absorción y distribución de las cargas durante los cambios de dirección y desaceleración, provocando mayores niveles de estrés mecánico (Paillard, 2021), suceso que ha sido asociado a la perdida de la función neuromuscular y de la eficiencia mecánica durante las labores que involucran actividades repetidas del ciclo de estiramiento-acortamiento (Dal Pupo et al., 2021), así como las alteraciones de las estrategias de activación muscular y de la estabilidad dinámica después de presentar estados de fatiga neuromuscular (Marcolin et al., 2022). Lo anterior podría desarrollar lesiones en el tobillo, debido a una menor capacidad de respuesta y control en momentos de altas intensidades. Teniendo en cuenta lo anterior, permite explicar por qué un porcentaje elevado de las lesiones reportadas en el estudio se presentaron durante las competencias.

Respecto a las variables de bienestar subjetivo, como la calidad del sueño, el estrés y la fatiga, su asociación con la lesión puede explicarse a partir de mecanismos fisiológicos y neurofuncionales. Se encontró en estudios que alteraciones en la calidad del sueño pueden afectar procesos de recuperación tisular y regulación hormonal, mientras que niveles elevados de estrés se asocian con incrementos en la actividad del sistema nervioso simpático y la liberación de cortisol, lo cual puede interferir con la coordinación motora. En este sentido, es posible que la fatiga acumulada influya negativamente el control neuromuscular, disminuyendo la precisión en la activación muscular, el tiempo de reacción y la capacidad de respuesta ante estímulos imprevistos. En los resultados encontrados en el presente estudio entre las variables de calidad de sueño, fatiga, estrés y cansancio postpartido reportaron unas asociaciones significativas con respecto a la aparición de lesiones. Por lo que el monitoreo constante de la carga interna y el bienestar subjetivo se hace importante para la prevención de lesiones (Saw et al., 2016).

Estudios recientes, refieren que las medidas arrojadas por los cuestionarios de bienestar son importantes y que forman una herramienta que permite la detección temprana de estados de fatiga antes que estos se manifiesten de forma clínica (Saw et al., 2016). Desde una perspectiva fisiológica, los resultados subjetivos de las encuestas reflejan las alteraciones en la homeostasis sistémica, lo que incluye también alteraciones en el equilibrio autonómico y aumento de los niveles de cortisol, lo que va a generar un impacto en los procesos de reparación tisular y recuperación muscular (Kellmann, M., et al. 2018).

En este sentido, el sueño juega un papel importante en la regulación neurofisiológica del control motor y la estabilidad articular (Castor et al., 2023). La alteración del sueño afecta en la excitabilidad cortical y la adecuada interacción de las redes neurales, las cuales son las encargadas de la planificación y de la ejecución de los movimientos, en los momentos de alteraciones del sueño se va a producir una disminución de la velocidad de procesamiento de la información sensorial, lo que va a producir un incremento en el tiempo de reacción y la alteración de la activación de las unidades motoras. (Wang et al., 2024; Gong, et al., 2024; Peng, Z., et al. 2025)

Adicionalmente, la fatiga y el déficit del sueño generan que se altere la sensibilidad de los mecanorreceptores articulares y musculares, lo que va a comprometer la propiocepción y el control sensoriomotor (Paillard, T. 2012). Lo que va a producir que la capacidad de detectar cambios en la posición articular y de promover los ajustes mecánicos en respuesta a los estímulos externos, también puede generar afectaciones en los ciclos de estiramiento acortamiento. Lo que estaría afirmado lo encontrado en las primeras semanas del seguimiento

realizado, en donde se encontró que los participantes que reportaron lesiones presentaron calificaciones altas durante las tres primeras semanas en la variable del sueño, con una significancia de (p = 0,028) en relación a la presencia de lesión.

Otro factor que se ha relacionado con el aumento del riesgo de lesión es el estrés, el cual puede afectar de manera cognitiva e incluso a nivel muscular (McMorris et al., 2019). En el caso de los árbitros de fútbol, esta variable toma gran importancia, puesto que los árbitros están expuestos a presiones constantes y adicionalmente a esto, deben tomar decisiones en tiempos cortos (Serrano, 2022). Lo que coincide con lo encontrado en la semana 19 del seguimiento donde se pudo observar un valor significativo de (p = 0,040) con relación a lesiones.

En cuanto a las variables neuromusculares, la dorsiflexión del tobillo y la fuerza muscular emergen como factores relevantes en la explicación del riesgo lesivo. Se apreció respecto a las limitaciones en el rango de dorsiflexión que pueden generar compensaciones en la mecánica del movimiento, particularmente durante acciones como la desaceleración, el aterrizaje y los cambios de dirección. Esto pueden alterar la distribución de cargas a lo largo de la cadena cinética, incrementando el estrés sobre las estructuras laterales del tobillo y favoreciendo mecanismos de lesión como la inversión forzada. Por otro lado, déficits en la fuerza, especialmente en los músculos que rodean el tobillo, pueden comprometer la capacidad de respuesta ante perturbaciones externas, aumentando la vulnerabilidad frente a eventos lesivos.

Mediante el análisis inferencial se encontró que, existía una asociación significativa en relación con la movilidad de tobillo en especial la dorsiflexión y las apariciones de lesiones en tobillos de los participantes con un valor de (p = 0,023). Este resultado corrobora la evidencia

descrita sobre la biomecánica, la cual establece que al presentar una dorsiflexion limitada se ve alterada la mecánica de apoyo del pie y adicionalmente a esto genera algunas compensaciones como, el aumento de la pronación, rotación interna de la tibia o el desplazamiento anterior del centro de gravedad (Catelotti et al., 2020). Otro estudio que afirma lo encontrado refiere que, las limitaciones en la movilidad de la dorsiflexión de tobillo generan una alteración de la mecánica del aterrizaje y puede generar un aumento del estrés sobre las estructuras anatómicas laterales del tobillo (Aquino et al., 2025).

Teniendo en cuenta lo anterior, la restricción de la dorsiflexión de tobillo no solo implica una limitación en el movimiento del pie, sino también representa una serie de adaptaciones fisiológicas que van a comprometer las funciones neuromusculares y de las capacidades de respuesta del sistema locomotor. A nivel musculo tendinoso, esta limitación puede deberse al aumento y la organización de las fibras de colágeno. Lo que generara una alteración de las propiedades viscoelásticas del tejido, lo que conlleva a la reducción de en la capacidad de deformarse y de absorber energía (Magnusson, & Kjaer, 2019).

Si se mira desde el punto de vista neurofisiológico, la limitación de la dorsiflexión va a generar un impacto en los mecanismos de propiocepción y control sensoriomotor. Los mecanorreceptores articulares, en conjunto con los usos musculares y los órganos tendinosos de Golgi, van a presentar una disminución en su sensibilidad ante los cambios de la tensión y la longitud muscular, lo que disminuye la información que va hacia el sistema nervio central, afectando así el desarrollo normal del movimiento corporal (Jastifer, 2025). Investigaciones recientes han probado que las alteraciones en la propiocepción en la articulación del tobillo se

encuentran directamente relacionadas con el déficit en la estabilidad postural y el control sensoriomotor (Liu et al., 2024; Hou et al., 2024), mientras que los husos musculares y los órganos tendinosos de Golgi realizan un papel importante en la regulación de la información propioceptiva necesaria para el control motor y postural (de Nooij & Zampieri, 2023).

A nivel biomecánico y funcional, la limitación en la dorsiflexión determina una alteración en la cinemática de la cadena cinética inferior, lo que va a reduciendo la capacidad de desplazar anteriormente la tibia durante las fases de apoyo (Zhang, et al. 2024). Por lo anterior, se van a producir compensaciones proximales y distales, lo que conlleva a una distribución de cargas de manera inadecuadas, generando un aumento del estrés sobre los ligamentos laterales del tobillo, en especial en el ligamento talofibular anterior (Zhang, et al. 2025).

Esto genera una alta probabilidad de sufrir un esguince en los tobillos a nivel de este ligamento, el cual, es el que más se ve afectado durante los esguinces de grado I, en relación con el presente estudio se destaca que este fue el diagnóstico con mayor predominancia durante el seguimiento realizado en este estudio. Lo anterior toma importancia con relación al presente estudio, ya que, los árbitros durante los encuentros deportivos realizan cambios de dirección muchas veces durante los compromisos.

Por otra parte, se pudo identificar diferencias significativas en las variables de la fuerza muscular de la plantiflexion ($p = 0,014$) y la dorsiflexión ($p = 0,044$). La fuerza de la musculatura de la pantorrilla y de los dorsiflexores, es muy importante, ya que, es la encargada de proporcionar la estabilidad activa en la articulación del tobillo (Gribble, 2019). La debilidad muscular en estos componentes anatómicos puede llegar a generar alteraciones en la estabilidad

dinámica y la absorción de la carga al realizar cambios de dirección (Gribble, 2019). Lo encontrado en el estudio va en concordancia con lo descrito en el programa FIFA 11+, el cual mostró eficiencia en la reducción de lesiones (Sadigursky et al., 2017), y adicional a este programa, también existen otros basados en propiocepción y fortalecimiento muscular, que han demostrado disminución en la aparición de lesiones de tobillo al aplicar entrenamientos de fuerza y propiocepción. (Artillez Almendáriz et al., 2019; García et al., 2018; Sánchez-Castillo, 2020).

En los últimos años, los modelos predictivos han tomado fuerza en el campo deportivo, en estudios realizados como el de Martins et al. (2025) se ha evidenciado que la combinación de variables de carga interna y externa, que fueron analizadas a través de modelos de *machine learning*, orienta y fortalece la objetividad en la capacidad de predecir si se compara con los enfoques univariados. Esto está en concordancia con lo hallado en el presente estudio, el cual integró diferentes variables, las cuales estuvieron relacionadas con las cargas internas y externas, el bienestar y pruebas neuromusculares, lo que permitió una mejor caracterización del riesgo de lesión.

El análisis por clústeres utilizado en este estudio se comprende como herramienta de carácter exploratorio orientada a identificar patrones o perfiles dentro de los datos. Los grupos obtenidos representan conjuntos de individuos con características similares en términos de carga, condición física y variables funcionales; sin embargo, estos no deben interpretarse como categorías definitivas de riesgo ni como evidencia de relaciones causales, esto enfatizando el carácter exploratorio del estudio. Se entiende que los clústeres aportaron una aproximación descriptiva que facilitó la comprensión de la heterogeneidad de la muestra, pero como indica la

literatura su utilidad se limita a la generación de hipótesis y no a la predicción directa de la aparición de lesiones.

En lo referente a la carga de entrenamiento, los resultados demuestran que las personas clasificadas en los clústeres que presentan mayor riesgo de lesión presentaron valores altos en los índices de la carga aguda/crónica, esta conducta coincide con lo descrito en investigaciones anteriores, donde se ha evidenciado que los cambios abruptos en la carga de entrenamiento componen un factor determinante en la manifestación de lesiones (Rossi et al., 2018; Martins et al., 2025). De tal manera, que lo encontrado en la presente investigación coinciden con la literatura, al determinar la carga de entrenamiento como uno de los principales factores de riesgo lesivo.

Por otra parte, evaluar la evolución de las variables a través del tiempo permitió establecer patrones dinámicos en el desarrollo del riesgo de lesión. Lo cual está ligado a los resultados encontrados en modelos predictivos recientes. En especial, Martins et al. (2025) donde indicaron que el utilizar espacios de tiempo más amplios para los seguimientos, mejora la capacidad predictiva de los modelos, sin embargo, los modelos con enfoque más avanzados, como el modelo DeepHit (Catterall, V et al., 2026)., refiere que es importante considerar el riesgo de lesión como una manifestación dependiente del tiempo. En contexto, lo encontrado en el presente estudio reafirma la idea de que el riesgo de lesión no es estático, y que por el contrario es dinámico y está condicionado por los cambios que se presenta durante el tiempo.

Asimismo, la introducción de variables relacionadas con el bienestar subjetivo, tales como, la fatiga, el estrés y la calidad de sueño, revelaron una notoria asociación con los perfiles

de riesgo identificados, los clúster que presentaron mayor riesgos fueron los que obtuvieron bajas puntaciones en estos indicadores, lo cual concuerda con las investigaciones recientes en las que valoraron variables psicofisiológicas en sus modelos predictivos, de tal manera evidenciaron mejoras en la precisión de la estimación de riesgo (Catterall, V et al., 2026).

Adicionalmente, la caracterización de perfiles de riesgo basada en el análisis de clúster en el actual estudio está acorde a lo expuesto en modelos de predicción de lesiones que se encuentran en la literatura. Diferente a lo mencionado en otros estudios como el de Martins et al. (2025), el cual encasilla a los investigados en función a la presencia o ausencia de lesión, el actual estudio contribuye a una aproximación adicional a la identificación de grupos con diferentes niveles de riesgo, teniendo en cuenta la combinación de diferentes variables.

De tal forma, Ma et al. (2025) en su investigación indica que la integración de variables de diferentes dimensiones, tales como, factores físicos y de carga, contribuyen a la identificación de riesgo de lesión de manera más precisa, estos resultados son coherentes con los de la presente investigación, en la cual, la combinación de variables de carga, bienestar y pruebas neuromusculares, permitieron identificar los perfiles de riesgo lesivo a través de clústeres, lo anterior refuerza la teoría de que los modelos predictivos no solo deben concentrar en la precisión del análisis, sino también del cómo interpretarse los resultados, todo esto con el fin de ayudar en la aplicabilidad en contextos prácticos en los entornos deportivos (Ma et al., 2025).

También es importante recalcar que los resultados que se obtuvieron en el estudio son comparables con otros estudios que empelan muestras moderadas, lo que fortalecer la aplicabilidad de estos tipos de modelos, a pesar de la limitación de no contar con un gran

volumen de datos, los estudios anteriores han demostrado que, si es posible el desarrollo de modelos predictivos robustos, con tan solo utilizar análisis longitudinales y variables relevantes (Martins et al., 2025; Rossi et al., 2018). En este contexto, los resultados obtenidos en el presente estudio aportan evidencia que apoya la viabilidad de utilizar modelos de machine learning en el mundo deportivo.

Sin embargo, se debe aclarar que los modelos de aprendizaje automático llevan a resultados que deben interpretarse en términos de su capacidad de clasificación dentro del conjunto de datos analizado. Aunque algunos algoritmos, como el árbol de decisión, mostraron un desempeño elevado, es necesario considerar que el tamaño de la muestra para este estudio fue reducido, lo que incrementa el riesgo de sobreajuste.

Por otra parte, la implementación de la inteligencia artificial en el estudio actual representa un avance hacia modelos predictivos con mayor integralidad en el mundo del arbitraje deportivo, en relación con los enfoques tradicionales, los cuales están basados en análisis univariados y a las asociaciones lineales. Hoy en día los algoritmos de *machine learning* permiten diferenciar patrones no lineales entre diferentes variables, lo cual resulta relevante a la hora del estudio de lesiones deportivas, puesto que estas son consideradas multifactoriales (Janiesch et al., 2021; Rossi et al., 2018).

Desde la perspectiva fisiológica y aplicada, el uso de modelos creados con inteligencia artificial, toman fuerza debido a su capacidad para la integración de información heterogénea y producir estimaciones de riesgo individualizado (Leckey et al., 2025). De tal manera que, la inteligencia artificial va a facilitar unas aproximaciones más cercanas teniendo en cuenta la

complejidad del sistema biológico humano, ya que estos modelos permiten la combinación de diferentes variables al mismo tiempo, las cuales, si se tomaran de manera aisladas o independientes, podrían no arrojar resultados estadísticamente significativos (Impellizzeri et al., 2020).

Adicionalmente, la actualización de la información sobre el riesgo de lesiones es constante en estos modelos, ya que permiten incorporar datos de manera longitudinal, lo que favorece el seguimiento continuo del estado de las personas, lo que resulta de gran utilidad en el contexto arbitral, donde se pueden observar variaciones constantes en la carga física. Por otra parte, la inteligencia artificial es una herramienta clave a la hora de tomar decisiones correspondientes a la prevención de lesiones, ya que permite procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real. (Martins et al., 2025).

No obstante, es de considerar importante que la efectividad de estos modelos va a depender de la calidad, cantidad y la variabilidad de la información disponible. En condiciones con muestras reducidas, como en el presente estudio, los algoritmos pueden presentar limitaciones (Leckey et al., 2025). Es por esto por lo que, los resultados obtenidos deben ser interpretados como una fase exploratoria en el desarrollo de un modelo predictivo.

La integración de la inteligencia artificial en el análisis de lesiones deportivas no solo permite ampliar la capacidad predictiva, sino también facilitar la capacidad de realizar prevención de manera personalizada, donde se podrá tomar en cuenta los perfiles de riesgo de cada persona, lo cual ayudará a optimizar la salud y el rendimiento deportivo. Por lo anterior, en este estudio se realizó un análisis mediante K-Means, el cual, permitió diferenciar tres grupos, en

donde se pudo evidenciar que en el clúster 2 se agrupo el perfil asociado a mayor presencia de variables relacionadas con lesión, las cuales mostraron alteraciones en las variables de sueño, estrés, movilidad articular y altas cargas acumuladas.

De tal manera que, la evidencia científica actual señala que los modelos basados en machine learning contribuyen a identificar las relaciones complejas y no lineales que pueden existir entre las variables, lo que permite superar los enfoques estadísticos tradicionales. (Rossi et al., 2018; Janiesch et al., 2021).

Teniendo en cuenta el rendimiento de los modelos predictivos, estudios previos han confirmado que la integración de datos de carga, obtenidos mediante tecnología como los GPS, optimizan la capacidad de predecir lesiones en el fútbol. Rossi et al. (2018), por ejemplo, crearon un modelo basado en datos recolectados durante los entrenamientos, los cuales lograron identificar patrones asociados a presentar riesgo lesional. En comparación con el presente estudio, el cual no incluyo con mediciones externas objetivas, y que por el contrario utilizo variables como la carga aguda/crónica y el bienestar subjetivo, en búsqueda de encontrar los factores asociados a lesión desde la percepción de los participantes y no solamente desde los datos arrojados por los dispositivos electrónicos.

De igual manera, investigaciones recientes han descripto que existe una alta variabilidad en el rendimiento de los modelos predictivos, dependiendo del tipo de algoritmo utilizado y de las variables analizadas (Amendolara et al., 2023; Leckey et al., 2025). Con lo anterior se puede observar lo difícil de predecir la aparición de las lesiones deportivas. En este contexto, los resultados obtenidos durante esta investigación son comparables con aquellos modelos que

presentan una precisión moderada, teniendo en cuenta cuando se utilizan variables subjetivas o muestra pequeña.

Por otra parte, la evidencia reciente focaliza que la capacidad de predecir lesiones aumenta cuando se utilizan múltiples dimensiones, como lo son las variables fisiológicas, psicológicas y físicas. En este sentido, Rico-González et al. (2023) enfatiza que, a pesar de que el uso de machine learning en el fútbol ha aumentado, aún persisten limitaciones importantes, las cuales están relacionadas con la naturaleza del deporte, lo que ha conllevado a presentar dificultad para alcanzar modelos altamente precisos y generalizables. Estas ideas coinciden con los resultados encontrados en la presente investigación, en la cual, a pesar de poder identificar tendencias relevantes, no se logró obtener una predicción robusta.

Además, se encontró que uno de los principales desafíos en la literatura es la heterogeneidad de la información y la falta de validación externa, lo que compromete la aplicabilidad de los modelos propuestos (Leckey et al., 2025). Este escenario es consistente con las limitaciones encontradas en el presente estudio, el cual se debe interpretar como una aproximación inicial en el uso de la inteligencia artificial en el análisis del riesgo de lesión.

En este estudio también se evidenció que, aunque el análisis inferencial no mostró relaciones estadísticamente significativas entre las variables consideradas y los clústeres obtenidos, los modelos predictivos aplicados: Árbol de Decisión, Regresión Logística y Random Fores, lograron predecir con precisión a qué grupo pertenecía cada observación. Esta diferencia entre los resultados inferenciales y los predictivos puede explicarse desde la naturaleza y los supuestos de cada enfoque.

En primer lugar, la estadística inferencial busca establecer relaciones significativas entre variables con base en modelos lineales o paramétricos, asumiendo independencia y homogeneidad en los datos (Hair et al., 2021). Su propósito es principalmente explicativo o causal, orientado a determinar si una variable tiene un efecto significativo sobre otra dentro de una muestra representativa de la población. Por tanto, la ausencia de significancia estadística indica que no se pudo demostrar una relación lineal fuerte bajo esos supuestos.

Por el contrario, el análisis predictivo propio del aprendizaje automático (*machine learning*) tiene como objetivo principal identificar patrones y optimizar la capacidad de predicción más que demostrar asociaciones causales (James et al., 2023). Modelos como los árboles de decisión o los algoritmos de tipo *ensemble* (como el Random Forest) pueden capturar relaciones no lineales, interacciones entre variables y estructuras complejas que los métodos inferenciales tradicionales no detectan. Así, una combinación de variables puede tener bajo valor predictivo individual, pero en conjunto formar un patrón de clasificación eficiente.

Adicionalmente, el uso del análisis de clúster permitió identificar grupos con comportamientos similares dentro del conjunto de datos, revelando heterogeneidades que violan el supuesto de homogeneidad de la inferencia estadística (Kaufman & Rousseeuw, 2009). Al aplicar posteriormente algoritmos predictivos sobre esos clústeres, fue posible “aprender” las reglas internas que caracterizan a cada grupo, logrando una adecuada clasificación. Esto sugiere que los patrones detectados por los modelos predictivos son estructurales y no necesariamente lineales, lo que explica la discrepancia con los resultados inferenciales.

Según la literatura mientras la estadística inferencial se centra en determinar si las relaciones son estadísticamente significativas, el enfoque predictivo busca evaluar la capacidad del modelo para anticipar resultados. Ambos enfoques son complementarios: el primero aporta comprensión teórica y causal, mientras que el segundo ofrece capacidad de generalización y utilidad práctica para la toma de decisiones (Shmueli, 2010).

Según los resultados en este estudio, se apreció que el riesgo de lesión de tobillo en árbitros de fútbol es un fenómeno multifactorial, determinado por la interacción entre la carga de exposición, el estado de recuperación y las capacidades neuromusculares, sin embargo, estos hallazgos deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio, particularmente el tamaño de la muestra y el carácter exploratorio del análisis predictivo, lo cual restringe la generalización de los resultados.

7 Aplicaciones Prácticas

La información obtenida sugiere la importancia de implementar estrategias dirigidas a la individualización en las cargas de entrenamientos y de las competencias, especialmente en aquellos árbitros que presentan altos niveles de fatiga, esto con el fin de ajustar el volumen competitivo, para reducir el riesgo de presentar sobrecarga. También, es importante poder establecer monitoreos constantes del bienestar, teniendo en cuenta las variables de sueño y estrés durante la planificación de los entrenamientos físicos, ya que estos tienen, valor muy alto en la susceptibilidad lesional y en la recuperación.

Del mismo modo, se recomienda la implementación de programas específicos que conlleven a mejorar la movilidad y el fortalecimiento del tobillo. Teniendo en consideración que, esta articulación presenta una alta vulnerabilidad en el campo del arbitraje. En este sentido, se debe plantear la inteligencia artificial como instrumento de apoyo a la hora de tomar decisiones deportivas y clínicas, mas no como un sustituto del criterio médico.

En la realidad nacional, donde los árbitros colombianos no son profesionalizados y debido a esto, deban dirigir múltiples partidos en un mismo fin de semana, se ve la importancia de adoptar un sistema de monitoreo, el cual, permita gestionar de una manera precisa las cargas de cada arbitro, con el fin de contribuir a la prevención de lesiones, teniendo en cuenta los datos obtenidos durante su seguimiento.

8 Conclusiones

La investigación permitió identificar que el riesgo de sufrir una lesión de tobillo en árbitros de fútbol va a estar asociado a la relación entre múltiples factores, especialmente la carga competitiva, variables neuromusculares y el bienestar subjetivo. Al igual, se puede concluir que la alta exposición a partidos y la acumulación de cargas componen elementos importantes en el desarrollo de la fatiga, lo que aumenta la probabilidad de presentar lesiones, por lo que el control de la carga aguada y crónica resulta de gran relevancia.

De tal forma, las variables como estrés, el sueño y la fatiga, sumado a la fuerza y a la movilidad de tobillo, evidenciaron ser importantes al momento de identificar el riesgo de lesión, lo que ratifica la necesidad de hacer prevención desde una perspectiva multidimensional.

Finalmente, se concluye afirmando que, el uso de modelos de inteligencia artificial permite la identificación de patrones complejos, lo que los posiciona como una herramienta de gran utilidad al momento de apoyar en la toma de decisiones, aunque los resultados del presente estudio se deben interpretar como una aproximación inicial, la cual requiere de una validación externa.

Para consolidar la evidencia y reforzar el alcance del modelo en su capacidad de clasificación, se recomienda que futuras investigaciones incrementen el tamaño de la muestra e incluyan árbitros de diferentes categorías y regiones, Así mismo, se sugiere desarrollar estudios multicéntricos y longitudinales con muestras de mayor tamaño , lo cual permitirá optimizar la

robustez estadística, disminuir el riesgo de sobreajuste y mejorar la capacidad de clasificación y generalización externa de los algoritmos de machine learning.

De igual manera, es importante realizar procesos de validación externos del modelo predictivo, lo que permitiría evaluar el desempeño en otras poblaciones, para poder determinar la capacidad real de la discriminación y de la medición del riesgo de lesión.

También se sugiere la utilización de algoritmos supervisados más robustos, donde se incorporen estrategias técnicas que perfeccionen la capacidad de predicción y se pueda minimizar inconveniente que se asocien con sobreajustes.

Para finalizar, se recomienda la integración de valoraciones de fuerza isocinética y análisis mediante plataformas de saltos, ya que con estas evaluaciones se podría enriquecer los resultados, y con ello fortalecer la capacidad predictiva y explicativa del modelo predictivo de lesiones.

9 Limitaciones del Estudio

El presente estudio presento limitaciones, como lo fueron, el número de participantes fue reducido, lo que limita un poco la generalización de los hallazgos, además las variables de carga y de bienestar fueron basadas en auto reporté, por lo que podría generar un posible sesgo en la medición.

Por otra parte, el uso de machine learning con muestras pequeñas puede generar un riesgo de sobreajuste, adicionalmente a esto, no se contó con una validación externa del modelo. Por lo tanto, los algoritmos que se desarrollaron deben ser interpretados como aproximaciones exploratorias iniciales y no como un modelo predictivo de lesiones definitivo.

10 Referencias

11 Álvarez Mantilla, A. J. (2018). Fisioterapia y su rol en el alto rendimiento: Una revisión sistemática de la literatura. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 7*(1), 1–12. https://doi.org/10.24310/riccafd.2018.v7i1.4853

12 Amendolara, A., Pfister, D., Settelmayer, M., Shah, M., Wu, V., Donnelly, S., Johnston, B., Peterson, R., Sant, D., Kriak, J., & Bills, K. (2023). An overview of machine learning applications in sports injury prediction. *Cureus*, *15*(9), e46170. https://doi.org/10.7759/cureus.46170

13 Komaini Antoni, A., Syaputra, A., Syafrianto, D., Gusril, G., Syamsuar, S., & Ayubi, N. (2022). Retos: Nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación. *Retos, 45*, 219–223.

14 Aquino, M. R. C., Resende, R. A., Van Emmerik, R., Souza, T. R., Fonseca, S. T., Kirkwood, R. N., & Ocarino, J. M. (2024). Influence of reduced passive ankle dorsiflexion range of motion on lower limb kinetics and stiffness during gait. *Gait & Posture, 109*, 147–152. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2024.01.020

15 Artillez Almendáriz, B. P. A., Bonifaz Arias, M. I. G., Zambonino Álvarez, E. E., & Sánchez Estrada, K. G. (2019). La propiocepción como método de prevención de lesiones de tobillo en deportistas de categoría superior. *Podium. Revista de Ciencia y Tecnología en la Cultura Física, 14*(3), 451–462.

16 Azevedo, J., Moreira-Silva, I., Seixas, A., Fonseca, P., Oliveira, J., & Vilas-Boas, J. P. (2024). The effect of muscle fatigue on the knee proprioception: A systematic

review. *Journal of Motor Behavior*, *56*(6), 772–804. https://doi.org/10.1080/00222895.2024.2341753

17 Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., & Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, *33*(15), 1574–1579. https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184

18 Blockeel, H., Devos, L., Frénay, B., Nanfack, G., & Nijssen, S. (2023). Decision trees: From efficient prediction to responsible AI. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *6*, 1124553. https://doi.org/10.3389/frai.2023.1124553

19 Bodini, B. D., Gianturco, L., Pregliasco, M., Cascio, A., Serafin, M., & Turiel, M. (2018). Foot and soccer: A pilot study searching "performance" through prevention. *Frontiers in Physiology*.

20 Castor, C. G. M., Santos, T. R. T., Souza, T. R., Araújo, P. A., Okai-Nóbrega, L. A., Ocarino, J. M., Silva, A., & Fonseca, S. T. (2023). Effect of sleep deprivation on postural control and dynamic stability in healthy young adults. *Neuroscience Letters*, *797*, 137055. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2023.137055

21 Catelotti, F., Trossero, S., Marcos, R. A., Romero, D., Lo Presti, M. S., & Barboza, G. (2020). Goniometry of flexion-extension ankle movement: Comparative analysis between bone reference method and neutral 0 method. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas*, *77*(4), 276–280. https://doi.org/10.31053/1853.0605.v77.n4.27655

22 Catterall, V., Midoglu, C., & Lynch, S. (2026). Time-to-injury forecasting in elite female football: A DeepHit survival approach. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.19479

23 Cipriano, P., Martins, P., Duarte, R., Preto, L., Peixoto, C., & Moreira, M. (2019). Investigation on soccer referees: A narrative review. *Polish Journal of Sport and Tourism*. https://doi.org/10.2478/pjst-2019-0016

24 Dal Pupo, J., Kons, R. L., Gheller, R. G., Costa, F. E., Vecchia, L. D., & Detanico, D. (2021). Neuromuscular impairment after high-intensity running and vertical jump exercise protocols. *Isokinetics and Exercise Science*, *29*(4), 361–367. https://doi.org/10.3233/ies-210129

25 de Nooij, J. C., & Zampieri, N. (2023). The making of a proprioceptor: a tale of two identities. *Trends in Neurosciences*, *46*(12), 1083–1094. https://doi.org/10.1016/j.tins.2023.09.008

26 Espín Pastor, V. E., & Lupera Reto, M. B. (2021). *Evaluación del movimiento funcional en los árbitros de categorías formativas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/items/688b1cd7-1d4d-4e4b-9324-99e1bec0e8b4

27 Estupiñán Ricardo, J., Leyva Vázquez, M. Y., Peñafiel Palacios, A. J., & El Assafiri Ojeda, A. (2021). Inteligencia artificial y propiedad intelectual. *Universidad y Sociedad, 13*(S3), 362–368.

28 Martínez-Monroy, F., Zamora-Velandia, A., & Martínez-Monroy, S. (2020). Perspectivas de los árbitros de fútbol en Colombia sobre sus condiciones laborales. *Espacios*, *41*, 154–170. https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n50p11

29 Gabbett, T. J. (2020). Debunking the myths about training load, injury and performance: Empirical evidence, hot topics and recommendations for practitioners. *British Journal of Sports Medicine*, *54*(1), 58–66. https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099784

30 García, P., Molina, M., Morcillo, J. A., & Cervera, F. (2018). Estrategias de prevención de lesiones deportivas en jóvenes futbolistas profesionales: Estabilidad del core y propiocepción. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte, 11*(4).

31 Gong, M., Sun, M., Sun, Y., & Jin, L. (2024). Effects of acute sleep deprivation on sporting performance: A systematic review and meta-analysis. *Nature and Science of Sleep, 16*, 935–948. https://doi.org/10.2147/NSS.S467531

32 Gribble, P. A. (2019). Evaluating and differentiating ankle instability. *Journal of Athletic Training*, *54*(6), 617–627. https://doi.org/10.4085/1062-6050-484-17

33 Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2021). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage Learning.

34 Harris, A., Gabbett, T. J., King, R., Bird, S. P., & Terry, P. (2025). Influence of acute and chronic load on perceived wellbeing, neuromuscular performance, and immune function in male professional football players. *Sports, 13*(6), 176. https://doi.org/10.3390/sports13060176

35 Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2015). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.

36 Hou, Z., Fong, D. T. P., & Winter, S. L. (2024). Decreased proprioception is associated with inferior postural control during unplanned landing in individuals with chronic ankle instability. *Journal of Sports Sciences*, *42*(20), 1932–1938. https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2419217

37 Impellizzeri, F. M., Menaspà, P., Coutts, A. J., Kalkhoven, J., & Menaspà, M. J. (2020). Training load and its role in injury prevention, part I: Back to the future. *Journal of Athletic Training, 55*(9), 885–892. https://doi.org/10.4085/1062-6050-500-19

38 Impellizzeri, F. M., Tenan, M. S., Kempton, T., Novak, A., & Coutts, A. J. (2020). Acute:chronic workload ratio: Conceptual issues and fundamental pitfalls. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 15*(6), 907–913. https://doi.org/10.1123/ijspp.2019-0864

39 James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An introduction to statistical learning: With applications in R* (2nd ed.). Springer.

40 James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2023). *An introduction to statistical learning with applications in R and Python* (2nd ed.). Springer.

41 Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets, 31*, 685–695. https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2

42 Jastifer, J. R. (2025). Contemporary review: Proprioception in ankle stability. *Foot & Ankle Orthopaedics, 10*(4). https://doi.org/10.1177/24730114251374662

43 Juliandewi, N. W. I., Kusuma, A. S., Putri, K. M. D., Indrawan, I. G. A., & Aristamy, I. G. A. A. M. (2025). Comparison of Naïve Bayes and Random Forest in sentiment analysis of state-owned banks management. *Indonesian Journal of Data and Science, 6*(3), 527–537. https://doi.org/10.56705/ijodas.v6i3.366

44 Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding groups in data: An introduction to cluster analysis*. Wiley.

45 Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., & Beckmann, J. (2018). Recovery and performance in sport: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance, 13*(2), 240–245. https://doi.org/10.1123/ijspp.2017-0759

46 Kelln, B. M., McKeon, P. O., Gontkof, L. M., & Hertel, J. (2008). Hand-held dynamometry: Reliability of lower extremity muscle testing in healthy, physically active young adults. *Journal of Sport Rehabilitation, 17*(2), 160–170. https://doi.org/10.1123/jsr.17.2.160

47 La historia de los árbitros de fútbol. (2018). Recuperado de https://www.cuadernosdefutbol.com/2023/07/el-arbitro-de-futbol/

48 Leckey, C., van Dyk, N., Doherty, C., Lawlor, A., & Delahunt, E. (2025). Machine learning approaches to injury risk prediction in sport: A scoping review with evidence synthesis. *British Journal of Sports Medicine, 59*(7), 491–500. https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108576

49 Li, J. (2024). An investigation of an athlete injury likelihood monitoring system using the random forest algorithm and DWT. *Technology and Health Care, 32*(4), 2657–2671. https://doi.org/10.3233/THC-231789

50 Liu, P. R., Lu, L., Zhang, J. Y., Huo, T. T., Liu, S. X., & Ye, Z. W. (2021). Application of artificial intelligence in medicine: An overview. *Current Medical Science, 41*(6), 1105–1115. https://doi.org/10.1007/s11596-021-2474-3

51 Liu, Y., Dong, S., Wang, Q., Liu, Z., Song, Q., & Shen, P. (2024). Deficits in proprioception and strength may contribute to the impaired postural stability

among individuals with functional ankle instability. *Frontiers in Physiology*, *15*, 1342636. https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1342636

52 Ma, J., Liu, S., & Pei, Y. (2025). SHAP-based interpretable machine learning for injury risk prediction in university football players. *Scientific Reports, 15*, 40252. https://doi.org/10.1038/s41598-025-24144-y

53 Marcolin, G., Cogliati, M., Cudicio, A., Negro, F., Tonin, R., Orizio, C., & Paoli, A. (2022). Neuromuscular fatigue affects calf muscle activation strategies, but not dynamic postural balance control in healthy young adults. *Frontiers in Physiology*, *13*, 799565. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.799565

54 Magnusson, S. P., & Kjaer, M. (2019). The impact of loading, unloading, ageing and injury on the human tendon. *The Journal of Physiology, 597*(5), 1283–1298. https://doi.org/10.1113/JP275450

55 Mahdavi Mohtasham, H., Shahrbanian, S., & Khoshroo, F. (2018). Epidemiology and history of knee injury and its impact on activity limitation among football referees. *Journal of Injury and Violence Research*. https://doi.org/10.5249/jivr.v10i1.963

56 Martins, F., Sarmento, H., Gouveia, É. R., Saveca, P., & Przednowek, K. (2025). Machine learning-based prediction of muscle injury risk in professional football. *Journal of Clinical Medicine, 14*(22), 8039. https://doi.org/10.3390/jcm14228039

57 Mastandrea, M., Tassi, A., Herbón, A. S., & Suárez, N. (2023). Evaluación de la estabilidad dinámica de miembro inferior a través de la prueba de salto lateral. *Argentinian Journal of Respiratory & Physical Therapy, 5*(2). https://doi.org/10.58172/ajrpt.v5i2.271

58 McMorris, T., Barwood, M., Hale, B. J., Dicks, M., & Corbett, J. (2019). Corrigendum to cognitive fatigue effects on physical performance. *Physiology & Behavior, 198,* 158. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.05.003

59 Moisen, G. G. (2008). Classification and regression trees. En S. E. Jorgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of ecology* (Vol. 1, pp. 582–588). Elsevier.

60 Page, R. M., Field, A., Langley, B., Harper, L. D., & Julian, R. (2023). The effects of fixture congestion on injury in professional male soccer. *Sports Medicine, 53*(3), 667–685. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01799-5

61 Paillard, T. (2012). Effects of general and local fatigue on postural control. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 36*(1), 162–176. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.05.009

62 Paredes Barros, M. F., & Torres Sailema, A. Á. (2018). *La preparación física y las lesiones deportivas en árbitros de fútbol* [Tesis]. Universidad Técnica de Ambato.

63 Peng, Z., Wang, Z., Xu, L., Shao, Y., Jiao, F., & Lv, J. (2025). Sleep deprivation impairs spatial cognitive processing. *Neuroscience*. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.11.039

64 Pereira, J. B., Gomes, Y. S., Oliveira, J. M. L., & Alencar, D. B. (2025). Analysis of Naive Bayes and Random Forest classification models. *IOSR Journal of Business and Management, 27*(5), 22–29. https://doi.org/10.9790/487X-2705092229

65 Pérez-Castillo, I. M., Rueda, R., Bouzamondo, H., López-Chicharro, J., & Mihic, N. (2023). Biomarkers of post-match recovery in football. *Frontiers in Physiology, 14*, 1167449. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1167449

66 Pethick, J., & Tallent, J. (2022). The neuromuscular fatigue-induced loss of muscle force control. *Sports (Basel, Switzerland)*, *10*(11), 184. https://doi.org/10.3390/sports10110184

67 Pita Fernández, S., & Valdés Cañedo, F. A. (2001). Determinación de factores pronósticos. *Cadernos de Atención Primaria*. https://www.fisterra.com/mbe/investiga/4f_pronosticos/4f_pronosticos2.pdf

68 Powden, C. J., Dodds, T. K., & Gabriel, E. H. (2019). Reliability of balance tests in healthy adults. *International Journal of Sports Physical Therapy, 14*(5), 683–694.

69 Rico-González, M., González Fernández, F. T., Oliveira, R., & Clemente, F. M. (2024). Acute:chronic workload ratio in soccer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P, 238*(4), 401–416. https://doi.org/10.1177/17543371231194283

70 Rico-González, M., Pino-Ortega, J., Méndez, A., Clemente, F. M., & Baca, A. (2023). Machine learning application in soccer. *Biology of Sport, 40*(1), 249–263. https://doi.org/10.5114/biolsport.2023.112970

71 Rodríguez Catalán, J., Pérez Sierra, J. A., Ceballos Sánchez, J. A., & Rendón Macías, M. (2018). Tratamiento de esguince de tobillo grado II. *Revista de Sanidad Militar*.

72 Rosales Malpartida, J. Y., & Loo Gil, C. (2025). Comparación de algoritmos de clasificación. *Tecnohumanismo, 5*(1), 147–162. https://doi.org/10.53673/th.v5i1.428

73 Rossi, A., Pappalardo, L., Cintia, P., Iaia, F. M., Fernández, J., & Medina, D. (2018). Injury forecasting in soccer using GPS data. *PLOS ONE, 13*(7), e0201264. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201264

74 Sadigursky, D., Braid, J. A., De Lira, D. N. L., et al. (2017). FIFA 11+ injury prevention program. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*.

75 Sanchez, R., Nieto, C., Leppe, J., Gabbett, T., & Besomi, M. (2025). Training load and injury associations. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *20*(5), 1918–1928. https://doi.org/10.1177/17479541251335613

76 Sánchez-Castillo, J. (2020). Protocolo para prevención de esguince de tobillo. *Revista Kronos*.

77 Sarı, Z., & Polat, M. G. (2019). Evaluación de posturas en árbitros asistentes. *Journal of Exercise Therapy and Rehabilitation*.

78 Saw, A. E., Main, L. C., & Gastin, P. B. (2016). Monitoring training response in athletes. *British Journal of Sports Medicine, 50*(5), 281–291. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094758

79 Serrano-Durá, J. (2022). Motivos de abandono en árbitros de fútbol. *Revista Española de Educación Física y Deportes, 463*(3). https://doi.org/10.55166/reefd.vi463(3).1051

80 Shmueli, G. (2010). To explain or to predict? *Statistical Science, 25*(3), 289–310. https://doi.org/10.1214/10-STS330

81 Valderrama, D. A., & Ocampo, J. F. (2018). Mecanismo de trauma. En *Enfoque del trauma ortopédico*.

82 Corrêa da Silva, V., Simim, M. A. M., Marocolo, M., & da Mota, G. R. (2018). Can compression stockings reduce fatigue? *Research in Sports Medicine*. https://doi.org/10.1080/15438627.2018.1527335

83 Vidal Lamela, M. (2019). *Estudio epidemiológico de lesiones en árbitros de fútbol* [Tesis]. Universidad de Coruña.

84 Vidal Lamela, M. (2020). *Prevalencia de lesiones en árbitros de fútbol* [Tesis]. Universidad de Coruña.

85 Wang, Z., Jiang, T., Xu, H., Wang, C., & Tang, R. (2024). Circadian rhythm sleep loss. *Scientific Reports, 14*, 18668. https://doi.org/10.1038/s41598-024-69242-5

86 Webb, M. D., Smith, L., Johnson, R., & Brown, T. (2024). Anthropometry and body image in athletes. *Frontiers in Psychology, 15*, 1372331. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1372331

87 Zhai, T., Zhang, J., & Han, D. (2022). Nursing in sports ankle injury. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte, 28*(6). https://doi.org/10.1590/1517-8692202228062022_0053

88 Zhang, Z., Xu, D., Gao, X., Liang, M., Baker, J. S., & Gu, Y. (2024). Ankle dorsiflexion restriction and biomechanics. *Applied Bionics and Biomechanics, 2024*, 9079982. https://doi.org/10.1155/2024/9079982

89 Zhang, Z., Xu, D., Wang, M., Zhou, H., Liang, M., Baker, J. S., & Gu, Y. (2025). Ankle dorsiflexion and knee injury risk. *Acta of Bioengineering and Biomechanics, 27*(1), 93–109. https://doi.org/10.37190/abb-02563-2024-03

Anexos

Anexo A. Consentimiento informado

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título del proyecto: "MODELO PREDICTIVO DE LESIONES DE TOBILLO EN ÁRBITROS DE FÚTBOL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL".

Director del proyecto: Andrés Felipe Villaquiran

Investigadores:

Yeison Ivan Méndez Jiménez, ivanmendez@unicauca.edu.co 3122368639

Fabian Alberto Perea Medina, fperea@unicauca.edu.co 3106174618

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO:

En el campo deportivo, las lesiones deportivas suelen ser una preocupación importante para los deportistas, entrenadores y personal de salud. En un entorno profesional, también implican impases para las organizaciones. Prevenir las lesiones puede ayudar a mejorar el rendimiento deportivo y competitivo. En este sentido, es posible pensar que, con los avances existentes en el desarrollo de algoritmos, machine learning e inteligencia artificial, se puede lograr identificar patrones relacionados con las lesiones deportivas a partir de la captura de datos provenientes de deportistas. Una vez identificados los patrones, es posible desarrollar modelos predictivos, donde los datos de los deportistas arrojen el riesgo de una futura lesión brindando información valiosa para el personal de entrenamiento y seguimiento médico para una atención temprana.

El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema para la captura y análisis de datos para la prevención de lesiones de tobillo a partir del uso de Inteligencia Artificial.

METODOLOGÍA

Estudio de cohorte, observacional, prospectivo.

Se desarrollará en árbitros de fútbol del departamento del Cauca, se tendrán en cuenta todos los árbitros inscritos en las organizaciones arbitrales del departamento, para una muestra de 50 árbitros, Como criterios de tipificación se tendrán en cuenta los siguientes:

El funcionamiento del algoritmo da pie a que se piense en el montaje de un sistema de recomendaciones a modo de prototipo. Los componentes del sistema de recomendaciones serán:

- Interfaz de usuario a través de un servicio web o una aplicación móvil
  - Módulo de captura de datos.
  - Módulo de recomendaciones.
- Servicio en la nube:
  - Almacenamiento en la nube de los datos recolectados.
  - Almacenamiento del algoritmo de machine learning predictivo de lesiones de tobillo
  - Servicio de procesamiento de datos en la nube para el funcionamiento del algoritmo

Una vez concluidas las pruebas de laboratorio y ajustes necesarios para el sistema de recomendaciones, se hará el proceso de transferencia tecnológica a un nivel TRL4, de forma tal que el sistema tenga una proyección comercial, siendo un servicio que se puede brindar a organizaciones arbitrales y escuelas de fútbol como clientes iniciales, pero que se pueda extender a otros deportes y la predicción de otras lesiones acorde a diferentes contextos.

BENEFICIOS DEL ESTUDIO

La oportunidad de aportar al ámbito de la actividad física, el ejercicio y deporte a través del uso de inteligencia artificial para el cuidado de la salud deportiva, la prevención de lesiones, el seguimiento del entrenamiento de los deportistas, el mejoramiento del rendimiento y el apoyo que brinda el sistema en el almacenamiento y análisis de datos tanto para profesionales de la salud como de las ciencias del deporte, facilitando la gestión, control y mitigación del riesgo de lesión de tobillo.

Generación de nuevo conocimiento para el manejo y control del riesgo de lesión de tobillo, la difusión de los resultados ante la comunidad científica para prevenir lesiones a nivel de la articulación de tobillo.

RIESGOS ASOCIADOS CON EL ESTUDIO

El presente estudio por ser clasificado como de riesgo mínimo debido a que la intervención a realizarse no es invasiva, pero por el carácter del programa de ejercicios se puede presentar eventualmente algún desmayo, caída o lesión osteomuscular. En este caso, el equipo investigador direccionará el paciente a la Entidad promotora de salud en la que se encuentre afiliado y en caso de sobrepasar o que la EPS no cubra los procedimientos requeridos, el equipo investigador asumirá los costos de tratamiento siempre y cuando esté comprobado que la atención requerida se derive de la intervención realizada por el equipo investigador.

Investigador encargado de la custodia de resultados: Yeison Iván mendaz J. 1061742323 Maestrante Tel. 3122368639. Fabian Alberto Perea Medina,1081410087 Tel. 3106174618 Maestrante Andrés Felipe Villaquiran H: 1061704024, docente Programa de Fisioterapia. Tel. 3246807670.

RESPONSABILIDAD DE LOS PARTICIPANTES EN LAS PRUEBAS U OBSERVACIONES Y REGISTROS

COMPENSACIÓN

El equipo investigador informará que no habrá ningún tipo de retribución económica por participar en la investigación y que los resultados de esta serán utilizados para el mejoramiento de las intervenciones en prevención de lesiones y entrenamiento deportivo.

VOLUNTARIEDAD

Usted está siendo invitado a participar en este estudio de investigación. Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Este proceso se conoce como consentimiento informado, Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto.

Una vez que haya comprendido el estudio y si usted desea participar, entonces se le pedirá que firme esta forma de consentimiento, de la cual se le entregará una copia firmada y fechada.

- No habrá ninguna consecuencia desfavorable usted, en caso de no aceptar la invitación.

- La participación es libre y voluntaria; si decide participar en el estudio, puede retirarse en el momento que lo desee, -aun cuando el investigador responsable no se lo solicite-, informando las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.

- En el transcurso del estudio usted podrá solicitar información actualizada sobre el mismo, al investigador responsable.

- Si considera que no hay dudas ni preguntas acerca de su participación, puede, si así lo desea, firmar la Carta de Consentimiento Informado que se anexa a este documento.

La información obtenida solamente será utilizada para la investigación mencionada en el presente documento y ante cualquier inquietud favor comunicarse con: Yeison Ivan Mendez J. Maestrante Tel. 3122368639. ivanmendez@unicauca.edu.co Fabian Alberto Perea Medina, Maestrante Tel. 3106174618 fperea@unicauca.edu.co Andrés Felipe Villaquiran Hurtado,

Docente investigador Programa de Fisioterapia de la Universidad del Cauca, celular: 3246807670, email: avillaquiran@unicauca.edu.co

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

He leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser publicados o difundidos con fines científicos. Convengo en participar en este estudio de investigación.

Nombre:

Firma:

Documento de identificación:

Recibiré una copia firmada y fechada de esta forma de consentimiento.

Esta parte debe ser completada por el Investigador (o su representante):

He explicado al Sr(a). _____ la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado acerca de los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a las preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si tiene alguna duda. Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apego a ella.

Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procederá a firmar el presente documento.

_____ _____

Firma del investigador Fecha.

Anexo B. ***Hojas de recolección de la información***

FICHA DE EVALUACIÓN PROYECTO "MODELO PREDICTIVO DE LESIONES DE TOBILLO EN ÁRBITROS DE FÚTBOL DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL.".

1. DATOS SOCIODEMOGRAFICOS

Nombre:					
Fecha de nacimiento:		Edad:		Sexo:	M: H: No especifica:
Dirección:			Celular:		
Correo electrónico:					

2. CARACTERISTICAS DEPORTIVAS

Disciplina:		Modalidad (arbitro, asistente)	
Categoría:		Tiempo de práctica (años)	
Frecuencia semanal de entrenos (días):		Tiempo de entreno al día: (minutos)	
Número de partidos a la semana:		Superficie de juego (natural, asfalto, sintética):	

3. ANTECEDENTES DE LESIÓN

¿Ha sufrido alguna lesión de tobillo? Si_____	¿Cuántas lesiones de tobillo ha tenido hasta el momento (número)? _____.	De las lesiones presentadas, ¿Qué estructuras se han visto comprometidas (Número)? Ligamento_____ Hueso_____

No_____		Tendón_____ Cartílago_____ Musculo_____ Nervio_____ Otro, ¿cuál? _____
¿Hace cuánto fue su última lesión de tobillo? Años_____ Meses_____	Usted, se lesiono durante (número de veces): Entrenamiento: _____ Competencia: _____	La última lesión se produjo durante: Los primeros 30 minutos: _____ Entre los 30 a 60 minutos: _____ Entre los 60 a 90 minutos: _____ Mayor a los 90 minutos _____
¿Cuántos días de incapacidad deportiva tuvo en su última lesión de tobillo (días)? _____	¿Realizo algún tipo de tratamiento para la lesión de tobillo? Si_____ No_____	¿Cuál fue el tratamiento realizado para su última lesión de tobillo?

4. LAXITUD ARTICULAR

Tilt Test	

Cajón anterior	

5. CARACTERISTICAS ANTROPOMETRICAS

Peso(kg):		Altura (cm):		Masa de musculo esquelético (kg):	
Masa grasa corporal(kg):		%grasa corporal:		Masa libre de grasa (kg):	
% grasa MMII DER		% grasa MMII IZQ:		Nivel de grasa visceral:	
%magra MMII DER:		% magra MMII IZQ:			

6. RANGO DE MOVIMIENTO ARTICULAR

Movimiento	Derecha ()	Izquierda ()
Lunge test		

Movimiento	Derecha (°)	Izquierda (°)
Dorsiflexión		
Plantiflexión		
Inversión		
Eversión		
Abducción cadera		
Aducción cadera		
Rotación interna cadera		
Rotación externa cadera		

7. FUERZA DINAMOMETRÍA

Movimiento	Derecha	Izquierda

Dorsiflexión		
Plantiflexión		
Inversión		
Eversión		
Abducción de cadera		
Extensión de cadera		

8. FATIGA MUSCULAR

Standing Heel- Rise Test	Derecha	Izquierda

9. POTENCIA DE SALTO

CMJ	Altura del salto	Tiempo de vuelo
	Tiempo de contacto	*Stiffness* muscular

Salto unipodal	Altura de salto (cm)	Fuerza (N)	Tiempo de vuelo (seg)	Velocidad (m/s)
Derecho				
Izquierdo				

Prueba de salto lateral	Derecha	Izquierda

10. ESTABILIDAD DINÁMICA

	Derecho	Izquierdo
Longitud miembro inferior (EIAS-maléolo medial)		
Anterior	1._____ 2._____ 3._____ P:_____	1._____ 2._____ 3._____ P:_____

Postero lateral	1._____ 2._____ 3._____ P:_____	1._____ 2._____ 3._____ P:_____
Postero medial	1._____ 2._____ 3._____ P:_____	1._____ 2._____ 3._____ P:_____
DAA ((Ant+PLat+Pmed)*100) / (LMI*3)		

ESTABILIDAD ESTATICA

Prueba de apoyo de una sola pierna	Derecha	Izquierda