



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

FACULTAD DE ENFERMERÍA Y FISIOTERAPIA

GRADO EN FISIOTERAPIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Trabajo de revisión sistemática

**EFFECTOS DEL USO DEL EXOESQUELETO
SOBRE LA MARCHA EN PACIENTES CON
LESIÓN MEDULAR**

AUTOR: Olga Dueña Lozano

TUTOR: Inés Llamas Ramos

Salamanca, junio 2026

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. LESIÓN MEDULAR.....	5
1.2. ETIOLOGÍA	5
1.3. CLASIFICACIÓN	5
1.4. MANIFESTACIONES CLÍNICAS	7
1.5. TRATAMIENTO	8
1.6. EL PAPEL DE LA FISIOTERAPIA	9
1.7. EXOESQUELETO	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ARTÍCULOS	11
4. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	13
5. DISCUSIÓN	19
6. CONCLUSIÓN	23
7. BIBLIOGRAFÍA	24
8. ANEXOS	28
8.1. ANEXO 1	28
8.2. ANEXO 2	29
8.3. ANEXO 3	30

RESUMEN

Introducción: La lesión medular constituye una causa importante de discapacidad y supone un gran coste económico. La rehabilitación mediante fisioterapia resulta fundamental, especialmente durante los primeros meses tras la lesión, periodo en el que la neuroplasticidad presenta mayor capacidad de recuperación. En los últimos años, el uso del exoesqueleto ha adquirido gran relevancia como parte de las estrategias terapéuticas.

Objetivo: Sintetizar y analizar la evidencia científica disponible sobre los efectos del uso del exoesqueleto en la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesión medular.

Material y métodos: Se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos de *PubMed*, *Scopus* y *PEDro* entre noviembre de 2025 y febrero de 2026. La valoración de calidad de los artículos seleccionados se llevó a cabo mediante la escala *PEDro*.

Síntesis de resultados: Se incluyeron siete ensayos clínicos aleatorizados. Los estudios mostraron mejoras significativas en diferentes parámetros relacionados con la marcha tras el entrenamiento con el exoesqueleto. Cabe destacar otras variables analizadas, como los cambios de tipo de dispositivo de asistencia, que reflejaron resultados más favorables para aquellos pacientes que entrenaron con exoesqueleto en comparación con el resto de las intervenciones. En relación con la seguridad y viabilidad de uso del exoesqueleto, los estudios registraron resultados positivos.

Conclusiones: El uso del exoesqueleto parece ser una intervención prometedora y potencialmente eficaz en la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesión medular. Sin embargo, la evidencia disponible no permite establecer una superioridad clara frente a otras intervenciones convencionales. Además, los estudios analizados respaldan la seguridad y viabilidad del exoesqueleto como herramienta terapéutica en la práctica clínica.

Palabras clave: “Lesión medular”, “rehabilitación de la marcha”, “exoesqueleto”

ABSTRACT

Introduction: Spinal cord injury is a major cause of disability and represents a substantial economic cost. Physiotherapy-based rehabilitation is essential, especially during the first months post-injury, a period in which neuroplasticity shows greater potential for recovery. Over the last few years, the use of exoskeletons has gained increasing relevance as part of therapeutic strategies.

Objective: To synthesize and analyze the available scientific evidence on the effects of exoskeleton use in gait rehabilitation in patients with spinal cord injury.

Material and methods: A literature search was conducted in the *PubMed*, *Scopus*, and *PEDro* databases between November 2025 and February 2026. The methodological quality of the selected articles was assessed using the *PEDro* scale.

Synthesis of results: Seven randomized controlled trials were included. The studies showed significant improvements in different gait-related parameters after exoskeleton-based training. Other variables were also assessed, such as changes in assistive device use, which showed more favorable outcomes in patients who trained with exoskeletons compared with the other interventions. Regarding safety and feasibility, the studies reported positive results.

Conclusion: The use of exoskeletons appears to be a promising and potentially effective intervention for gait rehabilitation in patients with spinal cord injury. However, the available evidence does not allow for clear superiority over conventional interventions. Additionally, the analyzed studies support the safety and feasibility of exoskeletons as a therapeutic tool in clinical practice.

Keywords: “Spinal cord injury”, “gait rehabilitation”, “exoskeleton”

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LESIÓN MEDULAR

La lesión medular es un daño traumático o no traumático de la médula espinal, caracterizada por la presencia de alteraciones motoras, sensitivas y/o autónomas por debajo del nivel de la lesión (1).

Actualmente, la lesión medular presenta una incidencia mundial de 15 a 40 casos por millón de habitantes, aumentando progresivamente cada año. El grupo de población más afectado es el comprendido por jóvenes de 21 a 30 años, siendo más frecuente esta patología en el sexo masculino (2).

La lesión medular constituye una causa importante de discapacidad y se asocia a elevadas tasas de mortalidad y morbilidad (3). La lesión medular supone un gran gasto económico, tanto en pacientes y familiares como a nivel mundial, debido a los recursos sanitarios requeridos. Por estas razones, se reconoce y cada vez en mayor medida, como una prioridad sanitaria a nivel mundial (3–5).

1.2. ETIOLOGÍA

La principal causa traumática de la lesión medular es el accidente de tráfico (afectando tanto a ocupantes como atropellados). Siguiendo a esta, se encuentran las caídas desde alturas y accidentes laborales. Las actividades deportivas y los intentos de suicidio también forman parte de los factores causales traumáticos, aunque en menor porcentaje (6). Por consiguiente, las causas más predominantes son prevenibles (5). Entre las causas no traumáticas más frecuentes se encuentran lesiones vasculares, neoplásicas o congénitas. La lesión no traumática es menos predominante, no obstante, ha sufrido un incremento en los últimos años debido al aumento de la esperanza de vida (6).

1.3. CLASIFICACIÓN

La clasificación neurológica más utilizada internacionalmente es la escala *ASIA* (6). Previamente, los pacientes son sometidos a una evaluación mediante las Normas Internacionales para la Clasificación Neurológica de la Lesión Medular (*ISNCSCI*) (7) (Figura 1). Esta valoración consta de exploración motora, exploración sensitiva e identificación del nivel de lesión medular. Respecto a este último, puede ser diferente en cada hemisferio y según el tipo de lesión sensitiva o motora (6).

ASIA NORMAS INTERNACIONALES PARA LA CLASIFICACIÓN NEUROLÓGICA DE LESIÓN DE LA MÚDULA ESPINAL (ISNCSCI) **ISCOS**

Nombre del Paciente _____ Fecha/Hora del Examen _____
Nombre Examinador _____ Firma _____

DERECHO MOTOR **SENSITIVO** **SENSITIVO** **MOTOR** **IZQUIERDO**
MÚSCULOS CLAVE PUNTOS SENSITIVOS CLAVE Tacto Fino (TFD) Pinchazo (PPD) PUNTOS SENSITIVOS CLAVE Tacto Fino (TFI) Pinchazo (PPI) MÚSCULOS CLAVE

ESD (Extremidad Superior Derecha) Flexores del codo C5
Extensores de muñeca C6
Extensores de codo C7
Flexores de los dedos de la mano C8
Abductores del dedo meñique T1

EID (Extremidad Inferior Derecha) Flexores de cadera L2
Extensores de rodilla L3
Dorsiflexores de tobillo L4
Extensores del dedo gordo del pie L5
Plantiflexores de Tobillo S1

(CAV) Contracción Anal Voluntaria (Sí/No) ☐

TOTALES DERECHA (MAXIMO) (50) (56) (56)

PARCIALES MOTORES **PARCIALES SENSITIVOS**
ESD ☐ + ESI ☐ = RMES TOTAL (50) EID ☐ + EII ☐ = RMEI TOTAL (50)
TFD ☐ + TFI ☐ = TF TOTAL (56) PPD ☐ + PPI ☐ = PP TOTAL (112)

NIVELES NEUROLÓGICOS 1. SENSITIVO ☐ ☐ 2. MOTOR ☐ ☐ 3. NIVEL NEUROLÓGICO DE LA LESIÓN (NLI) ☐ 4. COMPLETA O INCOMPLETA? ☐ 5. ESCALA DEFICIENCIA DE ASIA (AIS) ☐ 6. ZONA DE PRESERVACIÓN PARCIAL ☐ ☐ ☐ ☐

Page 1/2 Este formulario puede ser copiado libremente pero no puede ser alterado sin permiso de la American Spinal Injury Association. REV 04/19

Figura 1. Normas Internacionales para la Clasificación Neurológica de la Lesión Medular (ISNCSCI) (7)

La escala *ASIA* está compuesta por cinco grados: lesión completa (A), donde no existe preservación sensitiva ni motora; lesión sensitiva incompleta (B); lesión motora incompleta (C y D); y función normal (E), donde existe exploración neurológica normal tras lesión medular previa (8).

Además de esto, el Comité de Normas Internacionales de *ASIA* describe diferentes síndromes medulares (no incluidos en la clasificación *ASIA*) que constituyen una descripción cualitativa de los patrones anatómicos de afectación medular (7). Entre los principales síndromes medulares se incluyen la sección completa de la médula espinal, el síndrome medular central, el síndrome de *Brown-Sequard*, el síndrome medular anterior, el síndrome medular posterior y el síndrome de cono medular y cola de caballo (5,6,9).

1.4. MANIFESTACIONES CLÍNICAS

Según donde se localice la lesión los pacientes pueden sufrir paraplejia o tetraplejia. Se considera un paciente tetrapléjico cuando el nivel de la lesión se localiza entre C1-C8, teniendo consecuencias en extremidades superiores, tronco, extremidades inferiores y órganos pélvicos. El compromiso respiratorio tiene lugar cuando la lesión se encuentra en niveles superiores a C4. El paciente parapléjico es aquel que no sufre la lesión a nivel cervical. En estos casos se verán afectados tronco, extremidades inferiores y órganos pélvicos, dependiendo si la lesión se encuentra a nivel dorsal, lumbar o sacro (6) (Figura 2).

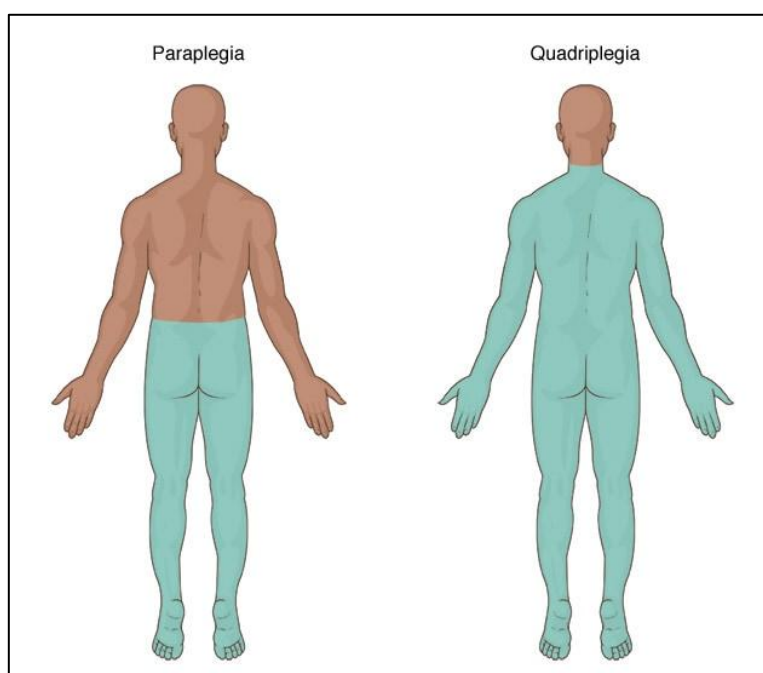


Figura 2. Representación de paraplejia y tetraplejia (10)

Además, los pacientes con lesión medular son susceptibles a padecer numerosas complicaciones como patologías respiratorias y cardiovasculares, problemas urinarios como infecciones o vejiga neurógena o afectaciones musculares como espasticidad o contracturas, entre otras (11). Según la OMS, un gran porcentaje de pacientes sufren dolor crónico y el 20-30% de ellos presentan signos depresivos (12). Según la evidencia, los pacientes con lesión medular presentan una mejor calidad de vida cuanto menor número de complicaciones desarrollan; por lo que, un tratamiento adecuado y la prevención de dichas complicaciones resulta fundamental en este tipo de pacientes (13).

1.5. TRATAMIENTO

Según los expertos, ante la sospecha de que una persona haya sufrido lesión medular, debe ser inmovilizada instantáneamente y trasladada a un centro hospitalario para su diagnóstico (12).

En las lesiones traumáticas, tras producirse el daño en la médula, se desarrolla una serie de reacciones bioquímicas conocidas en conjunto como cascada primaria. Esta activa una cascada secundaria, la cual provoca hemorragia, edema e isquemia. Estas consecuencias perjudican las posibilidades de recuperación. Por ello, los expertos piensan que el tratamiento farmacológico o quirúrgico antes de la activación de la cascada secundaria podría evitar dicha cascada. Sin embargo, la evidencia no es completamente sólida (13).

Durante las primeras horas, el paciente puede someterse a un tratamiento farmacológico con metilprednisolona, fármaco que funciona como neuro protector. Respecto a la intervención quirúrgica, se realiza con el objetivo de disminuir la compresión nerviosa y reducir la fractura o luxación en busca de mayor estabilidad de la columna (12).

Cuando el paciente se encuentra estable, comienza la fase de rehabilitación. El concepto de plasticidad neuronal tiene gran importancia durante esta etapa. La plasticidad neuronal hace referencia a los mecanismos que desencadenan cambios a nivel funcional y celular en la médula espinal. La remodelación sináptica o los nuevos brotes axonales son algunos de estos mecanismos, que pueden provocar una reorganización medular, favoreciendo así su recuperación. Estos procesos ocurren tanto por encima como por debajo del nivel de la lesión (14).

Según la evidencia disponible, para conseguir una rehabilitación óptima, el trabajo coordinado y multidisciplinar entre distintos profesionales sanitarios como fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales, dietistas o psicólogos, entre otros, es fundamental (10).

1.6. EL PAPEL DE LA FISIOTERAPIA

El tratamiento de fisioterapia es individualizado para cada paciente, teniendo en cuenta el nivel de su lesión y estado en el que se encuentra (11). Su objetivo es favorecer la recuperación de la función motora junto a la disminución de las secuelas musculoesqueléticas y sensoriales (14).

Entre las afectaciones musculares más comunes podemos encontrar debilidad, contracturas y espasticidad (11,15).

El entrenamiento de fuerza se utiliza para el tratamiento de músculos débiles sin parálisis, así como parcialmente paralizados. La recuperación funcional de la musculatura parcialmente paralizada representa un importante desafío terapéutico, por ello se realiza tratamiento combinado con electroestimulación (15). Esta, al igual que la estimulación transcutánea o epidural, utiliza las conexiones nerviosas intactas, aprovechando así el concepto de neuroplasticidad (16).

Además, la debilidad y parálisis de los músculos respiratorios provocan insuficiencia respiratoria. Es necesario eliminar las secreciones pulmonares utilizando técnicas de asistencia de tos, al igual que, aumentar volúmenes pulmonares con entrenamiento de músculos respiratorios o uso de fajas abdominales (15).

En el caso de las contracturas, el estiramiento es la técnica más utilizada para su tratamiento, así como la prevención. Según la evidencia disponible, la efectividad de esta técnica es cuestionable si se aplica durante un periodo corto. El ejercicio de movilidad articular pasiva es otra de las técnicas utilizadas, aunque la evidencia sobre sus efectos a corto plazo también es baja (15). No obstante, respecto a la espasticidad, la técnica de movilidad pasiva apunta a ser la única que consigue disminuir el tono muscular. Aun así, los resultados de los estudios llevados a cabo para probar la efectividad de las técnicas de tratamiento de la espasticidad son inconcluyentes (13).

Por otra parte, el 80% de los pacientes presentan secuelas en la función urinaria, como vejiga neurógena, afectación de los esfínteres o denervación de los músculos del suelo pélvico (17,18). El uso de terapia eléctrica con *biofeedback* o acupuntura y electroacupuntura combinadas con trabajo de suelo pélvico son técnicas de primera elección para el tratamiento de dichas patologías (17).

Respecto a la recuperación de la marcha, es uno de los objetivos prioritarios para los pacientes (19–21). Es necesario un entrenamiento intensivo y repetitivo para potenciar la plasticidad neuronal y lograr dicha recuperación. Sin embargo, la aparición de la fatiga es una barrera en estos casos. Para hacerle frente se han diseñado dispositivos electromecánicos automáticos, como exoesqueletos (20,21).

1.7. EXOESQUELETO

Durante la última década, el exoesqueleto se encuentra entre uno de los grandes avances tecnológicos, incorporado en los programas de rehabilitación de la marcha. Se define como un dispositivo mecánico formado por palancas que se adaptan al cuerpo, funcionando de manera combinada con el mismo y permitiendo así integrar la capacidad humana con la tecnología (22,23). Actualmente, existen en el mercado diferentes tipos de exoesqueletos, presentado cada uno características particulares, así como ventajas y limitaciones propias (22).

El exoesqueleto permite realizar sesiones intensas y repetitivas y contribuye a una reducción en la carga de trabajo para los terapeutas. Asimismo, gracias a los múltiples sensores por los que está formado, aporta una monitorización continua del paciente junto con una evaluación de progreso más completa (23,24). Sin embargo, el uso de estos dispositivos puede tener ciertas limitaciones, entre ellas el aumento de dependencia del exoesqueleto, produciendo una reducción de la actividad muscular y como consecuencia disminuyendo la participación activa del paciente (24).

El incremento del desarrollo de estos dispositivos ha sido notable en los últimos años (23), la evaluación sobre su eficacia se encuentra aún en fases iniciales, con una evidencia todavía débil. Esta situación demuestra la necesidad de sintetizar la evidencia actual, para comprender y profundizar su eficacia en la práctica clínica, especialmente en pacientes con lesión medular, donde la pérdida de independencia funcional supone un compromiso en la calidad de vida de dichos pacientes. Por tanto, debido a la rápida evolución tecnológica de los exoesqueletos se hace necesaria una actualización de la evidencia científica disponible.

2. OBJETIVOS

Principal

El objetivo principal es analizar la evidencia disponible sobre los efectos del uso del exoesqueleto en la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesión medular.

Secundarios

- Analizar los efectos funcionales en pacientes tras el entrenamiento con exoesqueleto.
- Comparar los resultados obtenidos con exoesqueleto frente a la terapia convencional u otros dispositivos.
- Determinar si el uso del exoesqueleto es seguro en la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesión medular.

3. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

La búsqueda y selección de los diferentes artículos se realizó desde noviembre de 2025 hasta febrero de 2026. La revisión se realizó siguiendo las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020.

En primer lugar, se establecieron los cuatro componentes de la pregunta PICO, para desarrollar una correcta estrategia de búsqueda (25).

- PACIENTE: Pacientes con lesión medular aguda, subaguda o crónica, clasificados según la escala *ASIA*.
- INTERVENCIÓN: Uso del exoesqueleto robótico.
- COMPARACIÓN: Grupo control sin intervención, con terapia convencional u otros dispositivos.
- RESULTADOS: Mejora en los parámetros de la marcha.

A continuación, se definieron una serie de conceptos principales: “lesión medular”, “exoesqueleto”, “marcha” y “rehabilitación”. A partir de ellos, se determinaron las palabras clave o “*keywords*” utilizadas en la búsqueda:

- “*Spinal cord injuries*” y “*spinal cord*”
- “*Exoskeleton device*” y “*exoskeleton*”

- “Gait”, “walking” y “locomotion”
- “Rehabilitation”

Estas palabras clave se unieron mediante los operadores booleanos “AND” y “OR”, para conformar las estrategias de búsqueda en las diferentes bases de datos.

La estrategia de búsqueda utilizada en la base de datos de *PubMed* fue la siguiente:

- (*spinal cord injuries [Mesh]*) AND (*exoskeleton device [Mesh]*) AND (*gait [Mesh]* OR *walking [Mesh]* OR *locomotion [Mesh]*).

La estrategia de búsqueda llevada a cabo en *Scopus* fue:

- (*spinal cord injuries*) AND (*exoskeleton device*) AND (*gait* OR *walking* OR *locomotion*) AND (*rehabilitation*).

Por último, en la base de datos de *PEDro* se utilizó la siguiente estrategia:

- “*spinal cord*” AND “*exoskeleton device*”.

➤ CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Los criterios de inclusión aplicados fueron:

- Artículos que se clasifiquen como ensayos clínicos aleatorizados (ECAs).
- Artículos con acceso a texto completo.
- Artículos con intervención en pacientes con lesión medular.
- Artículos que incluyan el uso de exoesqueleto.
- Artículos publicados en idioma español o inglés.
- Artículos publicados en los últimos 10 años.

➤ CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

Los criterios de exclusión aplicados fueron:

- Estudios que incluyan intervenciones en personas sanas.
- Estudios que no evalúen parámetros relacionados con la marcha.
- Estudios piloto.

➤ CALIDAD DE LOS ESTUDIOS

Se utilizó la escala *PEDro* (26) para evaluar la calidad metodológica de los ensayos clínicos aleatorizados seleccionados. La escala se muestra en el Anexo 1 y la evaluación completa de los estudios se encuentra en el Anexo 2.

4. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras realizar la búsqueda bibliográfica en las diferentes bases de datos se obtuvo un total de 524 resultados: 160 resultados en *PubMed*, 360 resultados en *Scopus* y 4 resultados en *PEDro*. Los artículos duplicados se eliminaron y el número de resultados se redujo a 366. A partir de ellos se realizó un primer cribado, aplicando los criterios de inclusión, leyendo título y resumen. Se eliminaron 348 artículos, quedando un total de 18 artículos. Tras un segundo cribado, mediante la lectura completa de los artículos y aplicando los criterios de exclusión, se obtuvo un resultado final de 7 artículos (Figura 3).

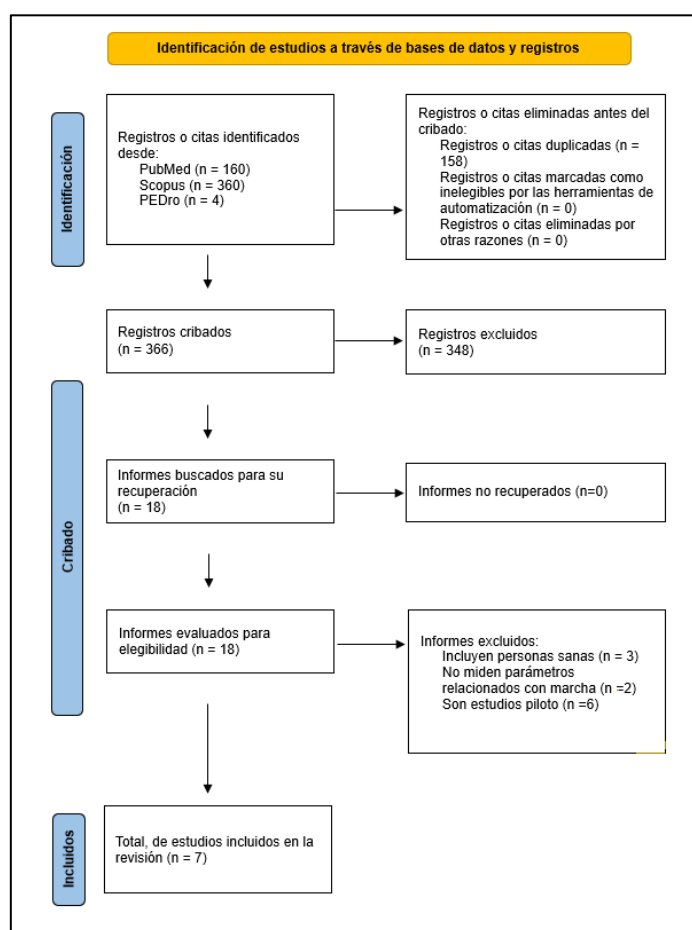


Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de los estudios incluidos en esta revisión

La información más relevante de los siete artículos seleccionados se encuentra en la tabla 1 y la tabla 2 del Anexo 3. Todos los artículos son ensayos clínicos aleatorizados. Seis de ellos cuentan con diseño de 2 grupos, destacando uno (27) por utilizar un diseño de ensayo cruzado y los otros cinco (20,21,28–30) compuestos por grupo control y grupo intervención. Respecto al artículo restante (31), utiliza un diseño de tres grupos.

Muestra

Se incluyeron 7 ECAS con un total de 254 participantes. Los participantes de todos los estudios eran personas con lesión medular. Según la fase de evolución, cuatro estudios (20,21,28,29) incluyeron muestras formadas por pacientes en fase subaguda (dos con menos de un año desde lesión, uno con menos de seis meses desde la lesión y otro con más de un mes). El resto de los estudios (27,30,31) se realizaron en pacientes crónicos (más de un año de la lesión).

Teniendo en cuenta la escala *ASIA*, tres estudios (21,28,31) incluyeron únicamente a pacientes con lesión medular incompleta, mientras que otros dos (27,30) realizaron el estudio exclusivamente con pacientes con lesión completa. Los estudios de *Xiang XN et al.* (29) y *Yildirim et al.* (20) incluyeron ambos tipos de pacientes.

Intervenciones

La frecuencia de las sesiones de entrenamiento varió de dos a cinco días por semana. La intervención que más tiempo duró fue la realizada por *Edwards et al.* (31) comprendiendo un periodo de 12 semanas, mientras que la de menor tiempo fue la llevada a cabo por *Xiang XN et al.* (29), abarcando 4 semanas. Dentro de este rango de tiempo se encuentran las intervenciones del resto de estudios.

Respecto a los cinco estudios que contaban con grupo control y grupo intervención, en tres de los estudios (21,28,29) el grupo intervención únicamente realizó entrenamiento de marcha con exoesqueleto. En los otros dos estudios (20,30) se complementó con tratamiento convencional. En relación al grupo control, cuatro estudios (20,21,28,29) llevaron a cabo tratamiento convencional, que incluía entrenamiento de la marcha y

fuerza en todos ellos. A parte, dos estudios (21,28), incorporaron movilización analítica; otro (20) movilidad articular junto a estiramientos y el restante (29) equilibrio y flexibilidad. El único estudio que no especifica qué tipo de ejercicios conformaban el tratamiento, fue el realizado por *Hu X et al.* (30), indicando únicamente que fue establecido según un consenso de expertos.

En cuanto al ensayo cruzado (27), ambos grupos (en momentos alternos) realizaron dos tipos de entrenamiento, diferenciándose por el dispositivo utilizado: exoesqueleto u ortesis *KAFO*. Además, hay que destacar que el 80 % de los participantes usaron la ortesis *KAFO* junto a la articulación *Walkabout*.

Por último, el estudio de *Edwards et al.* (31) estableció tres grupos: un grupo que realizó entrenamiento de marcha con exoesqueleto; un grupo de control activo que llevó a cabo entrenamiento de marcha en cinta con soporte de peso corporal y un grupo de control pasivo, que realizó su tratamiento habitual. Además, el entrenamiento de los dos primeros grupos podía completarse, si los participantes eran capaces, con entrenamiento sin soporte de peso corporal en el suelo.

Ninguno de los siete estudios utilizó el mismo tipo de exoesqueleto. No obstante, *Xiang XN et al.* (29), con un exoesqueleto de generación IV, y *Hu X et al.* (30), que no especificaron qué tipo de exoesqueleto utilizaron, recurrieron al uso de tecnología *Aider*. Los exoesqueletos utilizados en los otros cinco estudios fueron: exoesqueleto *Hank* (28), exoesqueleto *Ekso* (31), exoesqueleto *Lokomat* (20), exoesqueleto *ABLE* (27) y exoesqueleto *Fourier X2* (21), de última generación.

Variables

En relación con el rendimiento de la marcha, cuatro de los estudios (21,27,28,31) utilizaron la prueba de la marcha de los seis minutos (*6MWT*), para evaluar la capacidad de marcha basándose en la distancia caminada; la prueba de los diez metros marcha (*10 MWT*), para analizar la velocidad de la marcha y la prueba *Timed Up and Go (TUG)*, para valorar el equilibrio y movilidad funcional. Los estudios mostraron mejoras significativas en las variables medidas tras la intervención, sin existir diferencias significativas entre los diferentes tratamientos.

Además, el estudio realizado por *Rodríguez-Fernández et al.* (27), analizó durante la prueba de *6MWT* parámetros en relación a la cinemática de la marcha, parámetros espaciotemporales y consumo energético. Se observó una mejora significativa de la longitud del paso y del rango de movimiento de la rodilla del entrenamiento con exoesqueleto respecto al entrenamiento con ortesis *KAFO*, así como una disminución de los movimientos compensatorios (como circunducción). El entrenamiento con exoesqueleto también mostró una mejora más significativa de los pacientes en el desarrollo de una trayectoria recta, junto con mejoras en el desplazamiento del centro de masas. Respecto al consumo energético, no se encontraron diferencias significativas en ninguno de los entrenamientos. En este estudio también se registró una fuerte correlación entre las pruebas de la marcha y el nivel de lesión medular en relación con el uso de la ortesis *KAFO*, al contrario que con el uso del exoesqueleto.

El estudio llevado a cabo por *Xiang XN et al.* (29), utilizó la prueba de *6MWT* y la prueba de *10MWT*, para establecer correlaciones con parámetros ventilatorios. Se observó una correlación significativa entre la prueba de *6MWT* con función pulmonar y esfuerzo percibido en el grupo intervención. También se estableció correlación con la prueba de control del tronco (*TCT*), sin observarse resultados significativos.

Por otro lado, la escala de índice de marcha para lesión medular- 2.^a versión (*WISCI-II*) se utilizó en cuatro de los estudios (20,21,28,31) para evaluar el nivel de deambulación funcional, basándose en la capacidad de marcha según el uso de dispositivos de asistencia. En tres de ellos (20,21,28), se observó una mejora significativa en ambos grupos, siendo significativamente mayor en el grupo intervención. En el estudio restante (31) los resultados se mostraron de manera descriptiva, indicando un cambio de tipo de dispositivo en grupo exoesqueleto, tres cambios de dispositivos en el grupo de control activo y ningún cambio en el grupo de control pasivo.

Otra de las escalas utilizadas fue la escala de la medida de independencia de la médula espinal-III- 3.^a versión (*SCIM-III*), basándose en autocuidado, manejo respiratorio y esfínter, y actividad para evaluar la independencia funcional. Dos de los estudios (21,28) que incluyeron esta escala, registraron mejoras significativas en ambos grupos sin diferencias entre ellos; a diferencia del estudio de *Hu X et al.* (30), que únicamente

observó mejoras significativas en grupo control. El estudio realizado por *Yildirim et al.* (20), que utilizó la puntuación de la medida de independencia funcional (*FIM*), registró mejoras significativas en ambos grupos, siendo mayores en el grupo intervención.

Otra de las variables más registrada fue la seguridad de las intervenciones, evaluada en cuatro de los estudios (21,28,29,31) mediante la tasa y registro de eventos adversos, observándose únicamente algún efecto adverso leve, pero ninguno grave relevante. Además, en dos de estos estudios (21,28) se llevaron a cabo inspecciones cutáneas antes y después de cada sesión utilizando el sistema clasificación de úlceras por presión del panel asesor nacional de úlceras por presión de EEUU (*NPUAP*) y del panel asesor europeo de úlceras por presión (*EPUAP*). Asimismo, se valoró el dolor y la fatiga mediante la Escala EVA tras el final de cada sesión. En ambos estudios se registraron leves problemas cutáneos y niveles de dolor y fatiga tolerables en el grupo intervención.

En el ensayo clínico cruzado (27) se midió el impacto psicosocial con la Escala de impacto psicosocial de dispositivos de ayuda (*PIADS*) y la satisfacción del usuario mediante la evaluación de la satisfacción del usuario con tecnología de ayuda (*QUEST 2.0*), obteniéndose resultados positivos con los dos tipos de entrenamiento.

Otro estudio (30) utilizó el cuestionario breve de calidad de vida de la Organización Mundial de la Salud (*WHOQOL-BREF*) para medir la calidad de vida, sin observarse mejoras significativas en ninguno de los grupos, aunque el grupo intervención mostró tendencia a la mejora en varios dominios.

El estudio realizado por *Xiang XN et al.* (29) fue el único que evaluó la función de ventilación pulmonar con el uso de un espirómetro, registrando mejoras en algunos parámetros, como en la capacidad vital forzada (CVF) y volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV1) en ambos grupos, siendo más significativas en grupo intervención.

Además, en ese estudio se midió el grosor del cartílago de la rodilla mediante ecografía, observándose un efecto más favorable en el grupo intervención; la densidad mineral ósea del triángulo de *Wards*, evaluada mediante absorción de rayos X de energía dual, registrándose resultados no significativos; y la capacidad de realizar actividades básicas de la vida diaria mediante el índice de *Barthel* modificado, observándose mejoras en ambos grupos, siendo más significativos en grupo intervención. Este estudio también utilizó *TCT* para medir la función motora, y la escala de *Ashworth* modificada (*MAS*) para evaluar la espasticidad en miembros inferiores, observándose mejoras significativas en ambos grupos sin diferencias entre ellos. La fuerza muscular de las extremidades inferiores se evaluó mediante la puntuación motora de extremidades inferiores (*LEMS*), registrándose mejoras sin diferencias significativas entre grupos, al igual que en los estudios de *Khadour et al.* (21) y *Gil Agudo et al.* (28) que utilizaron la misma escala.

Para medir la carga de trabajo del terapeuta en las distintas intervenciones, en el estudio de *Edwards et al.* (31) utilizaron el índice de la carga de trabajo de la NASA (*TLX-NASA*). Aunque las puntuaciones de los dominios en los grupos fueron bajas, se registraron mejoras significativas en el dominio de frustración en los terapeutas pertenecientes al grupo de control activo.

Calidad metodológica

Por último, la calidad metodológica de los estudios osciló de seis a ocho puntos, puntuaciones que corresponden, según la escala *PEDro*, a una calidad metodológica buena (26). Las principales limitaciones en la mayoría de los estudios se relacionaron con los procesos de cegamiento, debido a la imposibilidad de cegar tanto de los participantes que recibieron las intervenciones como de los terapeutas que las aplicaron.

5. DISCUSIÓN

Esta revisión sintetiza la evidencia sobre los efectos del uso de exoesqueleto sobre la marcha, así como su seguridad y viabilidad en pacientes con lesión medular.

Los resultados de los estudios incluidos (21,27,28,31) sugieren que el uso del exoesqueleto es eficaz en la mejora de la velocidad y capacidad de marcha, al igual que en la movilidad funcional y equilibrio. Sin embargo, la eficacia del exoesqueleto no es superior a la observada en el resto de las intervenciones: tratamiento convencional, marcha en cinta rodante con soporte de peso corporal y tratamiento con ortesis *KAFO*. Por tanto, y teniendo únicamente en cuenta estas variables, el uso del exoesqueleto presenta la misma eficacia que el resto de las intervenciones, de acuerdo con la evidencia disponible (21,28,31). La similitud de eficacia entre tratamientos podría deberse a que, independientemente de la intervención, los pacientes se han sometido a un tratamiento intensivo y repetitivo, características claves para promover la neuroplasticidad. Estos resultados también podrían deberse al tipo de pruebas utilizadas, como la prueba *10MWT*, que analiza la velocidad de la marcha y, por consiguiente, puede que no sea tan sensible para detectar mejoras más sutiles (31).

Por ello, un parámetro de especial interés para tener en cuenta en la rehabilitación de la marcha es el nivel de deambulación funcional, analizado en varios estudios (20,21,28,31) mediante la escala *WISCI-II*. Al contrario que las otras pruebas de marcha mencionadas anteriormente (pruebas de rendimiento), esta escala se centra en los cambios del dispositivo de asistencia, lo que permite reflejar de manera más directa la funcionalidad de la marcha. Los resultados registrados en los estudios sugieren una mayor eficacia del uso exoesqueleto en la mejora del nivel de deambulación de la marcha respecto al tratamiento convencional. Este parámetro presenta además una estrecha relación con la fuerza muscular, la cual fue estudiada por varios autores (21,28,29) mediante la escala *LEMS*, reflejándose mejoras sin hallazgos significativos entre los diferentes grupos. Por tanto, los autores (21,28) sugieren que la mejora en el nivel de deambulación funcional asociada al uso del exoesqueleto podría deberse a otros factores como el equilibrio, componente clave en intervenciones con exoesqueleto. No obstante, el estudio llevado a cabo por *Edwards et al.* (31) mostró mayor frecuencia en los cambios dispositivos de asistencia en el grupo de control

activo respecto al grupo de exoesqueleto, impidiendo por tanto establecer una mayor eficacia del exoesqueleto ante el entrenamiento en cinta con soporte de peso corporal.

Cabe destacar el estudio realizado por *Rodríguez-Fernández et al.* (27) que registró interesantes hallazgos. Respecto al uso de la ortesis *KAFO*, se observó una fuerte correlación entre el rendimiento de las pruebas de la marcha y el nivel de la lesión medular, la cual fue menor con el uso del exoesqueleto. Esto parece indicar que el exoesqueleto podría reducir la influencia del nivel de lesión durante el entrenamiento, posiblemente gracias a la estabilidad que proporciona. Por otra parte, se observaron mejoras de los pacientes que entrenaron con exoesqueleto *ABLE*, en parámetros espaciotemporales (longitud del paso) y cinemáticos (rango de movimiento de la rodilla y trayectoria más recta) en comparación con aquellos que utilizaron la ortesis *KAFO*. Esto sugiere que el uso de exoesqueleto puede conllevar una mejora en el patrón de la marcha de los pacientes, acercándose a una marcha más fisiológica. En cuanto al consumo energético, no se observaron mejoras, al contrario que resultados registrados en estudios previos (27) que utilizaron exoesqueletos con asistencia en articulación de rodilla y cadera. Según estos autores, los hallazgos podrían deberse a que el exoesqueleto *ABLE* únicamente cuenta con asistencia en la articulación de rodilla, la cual posiblemente no sea suficiente para reducir el coste metabólico.

En relación a la independencia funcional, se observaron mejoras asociadas a las diferentes intervenciones que analizaron dicha variable (20,21,28,30), aunque con resultados contradictorios entre grupos. Varios autores (21,28) con muestra de pacientes en fase subaguda, registraron mejoras en ambos grupos, indicando por tanto una eficacia similar entre intervenciones. Por otro lado, uno de los estudios (20), que también incluyó pacientes con lesión subaguda, mostró mejoras más significativas en el grupo intervención, lo que indicaría una mayor eficacia del exoesqueleto. Por el contrario, el único estudio (30) que midió esta variable en pacientes crónicos, observó dichas mejoras en el grupo control, sugiriendo una menor eficacia del exoesqueleto. Esta variabilidad de resultados podría asociarse a la fase evolutiva en la que se encuentren los pacientes. Por consiguiente, el uso de exoesqueleto se relaciona con mejoras en la independencia funcional, pero sin demostrar ser una intervención más eficaz que el tratamiento convencional.

Otro estudio de interés es el realizado por *Xiang XN et al.* (29), que profundizó en la función ventilatoria pulmonar y su relación con parámetros de la marcha. Por un lado, analizó parámetros ventilatorios, registrando mejoras en CVF y FEV1 en ambos grupos, siendo mayores en el grupo exoesqueleto, sugiriendo ser una intervención beneficiosa para el aparato respiratorio, en concordancia con la evidencia disponible (29). Por otro lado, correlacionó los resultados con parámetros de la marcha, registrando que los participantes con mayor porcentaje de CVF y menor esfuerzo percibido pertenecientes al grupo exoesqueleto, lograban conseguir la mayor distancia en la prueba de *6MWT*. Además, se establecieron correlaciones con la estabilidad postural, sin encontrarse hallazgos entre grupos, sugiriendo que las mejoras de la marcha en los pacientes que utilizaron el exoesqueleto no tendrían tanta relación con ella. Esto indicaría que la función pulmonar juega un papel fundamental en la marcha, indicando que, a mayor función ventilatoria pulmonar, mayor distancia recorrida.

Analizando todas las variables estudiadas por los autores en relación con la marcha, la mayoría de ellos han seleccionado pruebas de rendimiento para su evaluación. No obstante, es de gran interés otros parámetros como el cambio de dispositivo de asistencia en estos pacientes, que puede indicar grandes mejoras en la funcionalidad. También parámetros espaciotemporales o cinemáticos, así como el consumo energético, incluidos en el estudio de *Rodríguez-Fernández et al.* (27), que aportan información sobre la calidad del patrón de marcha o su propia eficiencia. Asimismo, resaltar la importancia de establecer relaciones entre diferentes parámetros, como llevaron a cabo *Xiang XN et al.* (29), facilitando una interpretación más completa de los resultados.

Por otro lado, varios estudios (21,28,29,31) analizaron la seguridad, viabilidad y tolerancia del uso de exoesqueleto, aspectos de gran importancia, que, aunque no determinen la eficacia de una técnica, si su aplicabilidad en práctica clínica real. Los resultados de los estudios fueron concordantes entre sí, registrándose leves problemas cutáneos, así como aparición de fatiga y dolor, pero dentro de los límites tolerables, y sin comprometer la seguridad de los pacientes. Por tanto, y de acuerdo con la evidencia disponible (21,28,31), los resultados de los diferentes estudios confirman la seguridad y viabilidad en el uso del exoesqueleto para la rehabilitación de la marcha.

En la misma línea, uno de los estudios seleccionados (27) registró resultados positivos en relación con el impacto psicosocial y satisfacción de los usuarios con el uso del exoesqueleto, así como con la ortesis *KAFO*. La aceptación de un tratamiento por parte del paciente puede ser de gran relevancia a la hora de influir en la adherencia a este. Esto es un factor importante en el tratamiento del exoesqueleto, que busca potenciar la plasticidad neural mediante un entrenamiento intensivo y repetitivo, siendo por tanto necesaria la constancia. No obstante, el estudio de *Hu X et al.* (30) evaluó la calidad de vida de los pacientes sin observar resultados significativos. Una posible explicación sería que el impacto psicosocial y la satisfacción del usuario son aspectos más subjetivos e inmediatos, al contrario que la calidad de vida, que engloba más factores y requiere un mayor tiempo de intervención para influir sobre ella.

Entre las fortalezas de esta revisión destaca la inclusión exclusiva de ensayos clínicos aleatorizados. Asimismo, los estudios seleccionados presentaron una calidad metodológica entre buena y alta según la escala *PEDro*, lo que aporta mayor solidez a los resultados obtenidos. Otra fortaleza relevante es el análisis conjunto de variables relacionadas no solo con la eficacia de la marcha, sino también con la seguridad, viabilidad y tolerancia del uso del exoesqueleto, permitiendo una valoración más completa de su aplicabilidad clínica.

Sin embargo, hay que destacar que esta revisión sistemática presenta ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados. La eficacia similar entre las diferentes intervenciones en la mayoría de las variables de la marcha podría deberse a la heterogeneidad de la muestra. Los estudios incluyen pacientes en diferentes fases de evolución, siendo un aspecto relevante en relación con la neuroplasticidad, reflejando mayor expresión durante los primeros meses de la lesión. Además, los lesionados medulares presentaban distintos niveles de afectación, sometidos a tratamientos con diferentes tipos de exoesqueletos. Es cierto, que el estudio de *Rodríguez-Fernández et al.* (27), mostró que el exoesqueleto sería capaz de reducir la influencia del nivel de lesión durante el entrenamiento, proporcionando una mayor homogeneidad entre los pacientes. Al mismo tiempo, se puede dar gran importancia al pequeño tamaño muestral de los estudios incluidos, ninguno de los cuales supera los cincuenta participantes, exceptuando el estudio de *Yildirim et al.*

(20), con ochenta y ocho participantes, considerándose aun así por los propios autores una muestra limitada.

6. CONCLUSIÓN

La evidencia científica actual sugiere que el uso del exoesqueleto constituye una intervención eficaz para la rehabilitación de la marcha en pacientes con lesión medular mostrando beneficios en diferentes parámetros funcionales relacionados con la deambulación. Sin embargo, en la mayoría de las variables analizadas, la eficacia obtenida fue similar a la observada con otras intervenciones convencionales, lo que impide establecer una superioridad clara del exoesqueleto frente a otros tratamientos. Determinados parámetros funcionales, como el nivel de deambulación funcional y algunos aspectos cinemáticos de la marcha, mostraron resultados potencialmente favorables para esta tecnología.

Los estudios analizados respaldan la seguridad, viabilidad y buena tolerancia del uso del exoesqueleto en la práctica clínica. No obstante, la heterogeneidad metodológica, el reducido tamaño muestral y las diferencias entre dispositivos limitan la generalización de los resultados. Por ello, son necesarios futuros estudios con muestras más amplias, protocolos homogéneos y seguimiento a largo plazo que permitan consolidar la evidencia disponible y determinar con mayor precisión el papel del exoesqueleto en la rehabilitación de pacientes con lesión medular.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso AR, Rodríguez EO. Características clínicas, complicaciones secundarias y apoyos en personas con lesión medular traumática en Asturias. *Enfermería Global*. 2020;19(60):322-48. doi:10.6018/eglobal.421941
2. Yang R, Guo L, Wang P, Huang L, Tang Y, Wang W, et al. Epidemiology of Spinal Cord Injuries and Risk Factors for Complete Injuries in Guangdong, China: A Retrospective Study. *PLoS One*. 2014;9(1). doi:10.1371/journal.pone.0084733
3. Barbiellini Amidei C, Salmaso L, Bellio S, Saia M. Epidemiology of traumatic spinal cord injury: a large population-based study. *Spinal Cord*. 2022;60(9):812-9. doi:10.1038/s41393-022-00795-w
4. Singh A, Tetreault L, Kalsi-Ryan S, Nouri A, Fehlings MG. Global prevalence and incidence of traumatic spinal cord injury. *Clin Epidemiol*. 2014;6:309-31. doi:10.2147/CLEP.S68889
5. Margetis K, Das JM, Emmady PD. Spinal Cord Injuries. 2025 Jun 2. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan—. PMID: 32809556.
6. Huerta García A, Díaz Velázquez E. Análisis sobre la lesión medular en España. Toledo: Federación Nacional ASPAYM 2012.
7. Rupp R, Biering-Sørensen F, Burns SP, Graves DE, Guest J, Jones L, et al. International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury: Revised 2019. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*. 2021;27(2):1-22. doi:10.46292/sci2702-1
8. Arriagada G, Macchiavello N. Traumatismo raquímedular (TRM). Revisión bibliográfica. *Rev Med Clin Condes*. 2020;31(5-6):423-9. doi:10.1016/j.rmclc.2020.11.001
9. Diaz E, Morales H. Spinal Cord Anatomy and Clinical Syndromes. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*. 2016;SI: Spinal Cord Imaging, Part 137(5):360-71. doi:10.1053/j.sult.2016.05.002

10. Mayo Clinic. Lesiones de la médula espinal. [página web en Internet]. Rochester (MN): Mayo Foundation for Medical Education and Research; 2021. [Citado 10 de mayo de 2026] Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/spinal-cord-injury/multimedia/spinal-cord-injuries/img-20008455>
11. Nas K, Yazmalar L, Şah V, Aydın A, Öneş K. Rehabilitation of spinal cord injuries. *World J Orthop.* 2015;6(1):8-16. doi:10.5312/wjo.v6.i1.8
12. Organización Mundial de la Salud. Al menos 500 000 personas sufren lesiones medulares cada año [página web en Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2013. [Citado 26 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/02-12-2013-spinal-cord-injury-as-many-as-500-000-people-suffer-each-year>
13. Tasiemski T, Kujawa J, Tederko P, Rubinelli S, Middleton JW, Craig A, et al. Relationship between secondary health conditions and life satisfaction in persons with spinal cord injury: study across twenty-one countries. *Qual Life Res.* 2023;32(7):2069-77. doi:10.1007/s11136-023-03376-3
14. Obrero-Gaitán E, López-Nájera L, Piñar-Lara M, Ibancos-Losada M del R, Cortés-Pérez I, García-López H. Improving Balance and Functional Status in Spinal Cord Injury Patients: A Systematic Review Comparing Virtual Reality-Based Therapy and Conventional Therapeutic Exercises. *Electronics.* 2024;13(13):2594. doi:10.3390/electronics13132594
15. Glinsky JV, Harvey LA. Physiotherapy management of people with spinal cord injuries: an update. *Journal of Physiotherapy.* 2024;70(4):256-64. doi:10.1016/j.jphys.2024.09.008
16. Kanakis AK, Benetos IS, Evangelopoulos DS, Vlamis J, Vasiliadis ES, Kotroni A, et al. Electrical Stimulation and Motor Function Rehabilitation in Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *Cureus.* 2024;16(5):e61436. doi:10.7759/cureus.61436

17. Hernández Rodríguez D, Pérez-de la Cruz S, Hernández Rodríguez D, Pérez-de la Cruz S. Tratamiento del suelo pélvico en varones con lesión medular incompleta: revisión sistemática. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*. 2020;43(3):381-92. doi:10.23938/assn.0868
18. Sato-Klemm M, Williams AMM, Mortenson WB, Lam T. Knowledge, Attitudes, and Practice of Pelvic Floor Muscle Training in People With Spinal Cord Injury: A Cross-Sectional Survey. *Front Rehabil Sci*. 2022;3:893038. doi:10.3389/freesc.2022.893038
19. Ditunno PL, Patrick M, Stineman M, Ditunno JF. Who wants to walk? Preferences for recovery after SCI: a longitudinal and cross-sectional study. *Spinal Cord*. 2008;46(7):500-6. doi:10.1038/sj.sc.3102172
20. Yıldırım MA, ÖNEŞ K, GÖKŞENOĞLU G. Early term effects of robotic assisted gait training on ambulation and functional capacity in patients with spinal cord injury. *Turk J Med Sci*. 2019;49(3):838-43. doi:10.3906/sag-1809-7
21. Khadour FA, Khadour YA, Xiang G, Dao X. Walking rehabilitation in incomplete spinal cord injury: evaluating the impact of robotic exoskeleton-assisted training. *Biomed Eng Online*. 2026;25:45. doi:10.1186/s12938-026-01532-7
22. Fernández Álvarez LG, Núñez Nagy S, Cano De La Cuerda R. Exoesqueletos portables en personas con lesión medular. Revisión sistemática. *RIECS*. 2020;5(1):86-105. doi:10.37536/RIECS.2020.5.1.194
23. Chen B, Ma H, Qin LY, Gao F, Chan KM, Law SW, et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *J Orthop Translat*. 2015;5:26-37. doi:10.1016/j.jot.2015.09.007
24. Fleerkotte BM, Koopman B, Buurke JH, van Asseldonk EHF, van der Kooij H, Rietman JS. The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: an explorative study. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:26. doi:10.1186/1743-0003-11-26

25. Eriksen MB, Frandsen TF. The impact of patient, intervention, comparison, outcome (PICO) as a search strategy tool on literature search quality: a systematic review. *J Med Libr Assoc.* 2018;106(4):420-31. doi:10.5195/jmla.2018.345
26. Cashin AG, McAuley JH. Clinimetrics: Physiotherapy Evidence Database (PEDro) Scale. *Journal of Physiotherapy.* 2020;66(1):59. doi:10.1016/j.jphys.2019.08.005
27. Rodríguez-Fernández A, Lobo-Prat J, Tarragó R, Chaverri D, Iglesias X, Guirao-Cano L, et al. Comparing walking with knee-ankle-foot orthoses and a knee-powered exoskeleton after spinal cord injury: a randomized, crossover clinical trial. *Sci Rep.* 2022;12:19150. doi:10.1038/s41598-022-23556-4
28. Gil-Agudo Á, Megía-García Á, Pons JL, Sinovas-Alonso I, Comino-Suárez N, Lozano-Berrio V, et al. Exoskeleton-based training improves walking independence in incomplete spinal cord injury patients: results from a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil.* 2023;20(1):36. doi:10.1186/s12984-023-01158-z
29. Xiang XN, Zhang LM, Zong HY. Exoskeleton-Assisted Walking for Pulmonary and Exercise Performances of SCI Individuals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.* 2023;31:38-47. doi:10.1109/TNSRE.2022.3215652
30. Hu X, Lu J, Wang Y. Effects of a lower limb walking exoskeleton on quality of life and activities of daily living in patients with complete spinal cord injury: A randomized controlled trial. *Vol. 32.* 2024;32(1):243-53. doi:10.3233/THC-220871
31. Edwards DJ, Forrest G, Cortes M, Weightman MM, Sadowsky C, Chang SH, et al. Walking improvement in chronic incomplete spinal cord injury with exoskeleton robotic training (WISE): a randomized controlled trial. *Spinal Cord.* 2022;60(6):522-32. doi:10.1038/s41393-022-00751-8

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1. Ítems de evaluación de la escala PEDro (26)

Escala PEDro-Español

1. Los criterios de elección fueron especificados	no ☐ si ☐	donde:
2. Los sujetos fueron asignados al azar a los grupos (en un estudio cruzado, los sujetos fueron distribuidos aleatoriamente a medida que recibían los tratamientos)	no ☐ si ☐	donde:
3. La asignación fue oculta	no ☐ si ☐	donde:
4. Los grupos fueron similares al inicio en relación a los indicadores de pronóstico más importantes	no ☐ si ☐	donde:
5. Todos los sujetos fueron cegados	no ☐ si ☐	donde:
6. Todos los terapeutas que administraron la terapia fueron cegados	no ☐ si ☐	donde:
7. Todos los evaluadores que midieron al menos un resultado clave fueron cegados	no ☐ si ☐	donde:
8. Las medidas de al menos uno de los resultados clave fueron obtenidas de más del 85% de los sujetos inicialmente asignados a los grupos	no ☐ si ☐	donde:
9. Se presentaron resultados de todos los sujetos que recibieron tratamiento o fueron asignados al grupo control, o cuando esto no pudo ser, los datos para al menos un resultado clave fueron analizados por "intención de tratar"	no ☐ si ☐	donde:
10. Los resultados de comparaciones estadísticas entre grupos fueron informados para al menos un resultado clave	no ☐ si ☐	donde:
11. El estudio proporciona medidas puntuales y de variabilidad para al menos un resultado clave	no ☐ si ☐	donde:

La escala PEDro está basada en la lista Delphi desarrollada por Verhagen y colaboradores en el Departamento de Epidemiología, Universidad de Maastricht (Verhagen AP et al (1998). *The Delphi list: a criteria list for quality assessment of randomised clinical trials for conducting systematic reviews developed by Delphi consensus. Journal of Clinical Epidemiology*, 51(12):1235-41). En su mayor parte, la lista está basada en el consenso de expertos y no en datos empíricos. Dos ítems que no formaban parte de la lista Delphi han sido incluidos en la escala PEDro (ítems 8 y 10). Conforme se obtengan más datos empíricos, será posible "ponderar" los ítems de la escala, de modo que la puntuación en la escala PEDro refleje la importancia de cada ítem individual en la escala.

El propósito de la escala PEDro es ayudar a los usuarios de la bases de datos PEDro a identificar con rapidez cuales de los ensayos clínicos aleatorios (ej. RCTs o CCTs) pueden tener suficiente validez interna (criterios 2-9) y suficiente información estadística para hacer que sus resultados sean interpretables (criterios 10-11). Un criterio adicional (criterio 1) que se relaciona con la validez externa ("generalizabilidad" o "aplicabilidad" del ensayo) ha sido retenido de forma que la lista Delphi esté completa, pero este criterio no se utilizará para el cálculo de la puntuación de la escala PEDro reportada en el sitio web de PEDro.

La escala PEDro no debería utilizarse como una medida de la "validez" de las conclusiones de un estudio. En especial, avisamos a los usuarios de la escala PEDro que los estudios que muestran efectos de tratamiento significativos y que puntúan alto en la escala PEDro, no necesariamente proporcionan evidencia de que el tratamiento es clínicamente útil. Otras consideraciones adicionales deben hacerse para decidir si el efecto del tratamiento fue lo suficientemente elevado como para ser considerado clínicamente relevante, si sus efectos positivos superan a los negativos y si el tratamiento es costo-efectivo. La escala no debería utilizarse para comparar la "calidad" de ensayos realizados en las diferentes áreas de la terapia, básicamente porque no es posible cumplir con todos los ítems de la escala en algunas áreas de la práctica de la fisioterapia.

8.2. ANEXO 2. Evaluación de calidad metodológica de los estudios mediante la escala *PEDro*

ARTÍCULO	Ítem 1	Ítem 2	Ítem 3	Ítem 4	Ítem 5	Ítem 6	Ítem 7	Ítem 8	Ítem 9	Ítem 10	Ítem 11	Total
<i>Edwards et al.</i> (2022) (31)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	6/10
<i>Xiang XN et al.</i> (2022) (29)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	8/10
<i>Rodríguez-Fernández et al.</i> (2022) (27)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	7/10
<i>Hu X et al.</i> (2024) (30)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	SI	6/10
<i>Khadour et al.</i> (2026) (21)	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	7/10
<i>Yildirim et al.</i> (2019) (20)	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	6/10
<i>Gil Agudo et al.</i> (2023) (28)	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	SI	7/10

8.3. ANEXO 3. Características principales de los estudios incluidos

Tabla 1. Muestra e intervenciones.

ID	Muestra	Grupos e Intervenciones	Duración
<i>Edwards et al.</i> (2022) (31)	25 participantes con LM crónica (más de un año desde la lesión) y clasificación <i>ASIA</i> C o D (incompleta)	G <i>EXO</i> : 9 participantes. Entrenamiento de marcha con <i>EXO Ekso</i> + marcha OG sin <i>BWS</i> (si era posible) G CA: 10 participantes. Entrenamiento de marcha <i>BWSTT</i> + marcha OG sin <i>BWS</i> (si era posible) G CP: 6 participantes. Tratamiento habitual	G <i>EXO</i> y G CA realizaron 3 sesiones (45 minutos) por semana, durante 12 semanas (36 sesiones en total) G CP continuó su entrenamiento habitual durante 12 semanas.
<i>Xiang XN et al.</i> (2022) (29)	40 participantes con LM subaguda (al menos un mes desde la lesión) y clasificación <i>ASIA</i> A, B o C (completa e incompleta)	GI: 20 participantes. Entrenamiento de marcha con <i>EXO</i> generación IV y tecnología <i>Aider</i> GC: 20 participantes. Ejercicio convencional (fuerza, equilibrio, flexibilidad y marcha con soporte)	Ambos grupos realizaron 4 sesiones de entrenamiento (50-60 minutos) por semana durante 4 semanas (16 sesiones en total)
<i>Rodríguez-Fernández et al.</i> (2022) (27)	10 participantes con LM crónica (más de un año desde la lesión) y clasificación <i>ASIA</i> A o B (completa)	E1: Entrenamiento marcha con <i>EXO ABLE</i> (incluía transiciones de pie a sentado y viceversa y ejercicios en bipedestación) E2: Entrenamiento marcha con <i>KAFO</i> (incluía transiciones de pie a sentado y viceversa y ejercicios en bipedestación) Ensayo cruzado. 5 participantes realizaron E1 y otros 5 participantes E2. Tras 2 semanas de lavado, los tratamientos se intercambiaron	En cada entrenamiento se realizaron 2 sesiones (90 minutos) por semana durante 5 semanas (10 sesiones en total)

<i>Hu X et al.</i> (2024) (30)	20 participantes con LM crónica y clasificación <i>ASIA</i> A o B (completa)	GI: 10 participantes. Terapia de ejercicio rutinaria (según consenso de expertos) + Entrenamiento de marcha con <i>EXO</i> con tecnología <i>Aider</i> GC: 10 participantes. Terapia de ejercicio rutinaria (según consenso de expertos)	Ambos grupos realizaron 5 sesiones de entrenamiento (40-50 minutos) por semana durante 8 semanas (40 sesiones en total)
<i>Khadour et al.</i> (2026) (21)	48 participantes con LM subaguda (primer año de la lesión) y clasificación <i>ASIA</i> C o D (incompleta)	GI: 24 participantes. Entrenamiento marcha con <i>EXO Fourier X2</i> GC: 24 participantes. Entrenamiento de reeducación marcha (manual y en paralelas/con ayudas), movilización analítica y trabajo fuerza	Ambos grupos realizaron 3 sesiones (30 minutos) por semana durante 5 semanas (15 sesiones en total)
<i>Yildirim et al.</i> (2019) (20)	88 participantes con LM subaguda (hasta 6 meses desde la lesión) y clasificación <i>ASIA</i> A, B, C o D (completa e incompleta)	GI: 44 pacientes. Entrenamiento marcha con <i>EXO Lokomat</i> + Terapia convencional (movilidad articular, fortalecimiento, estiramientos y entrenamiento marcha) GC: 44 pacientes. Terapia convencional (movilidad articular, fortalecimiento, estiramientos y entrenamiento marcha)	Ambos grupos realizaron 5 sesiones a la semana (2 veces al día) durante 8 semanas (80 sesiones en total). Además, el GI realizó 2 sesiones con <i>EXO</i> por semana durante estas 8 semanas (16 sesiones más)

<i>Gil Agudo et al. (2023) (28)</i>	23 participantes con LM subaguda (menos de 1 año desde la lesión) y clasificación <i>ASIA C</i> o <i>D</i> (incompleta)	GI: 12 participantes. Entrenamiento de marcha con <i>EXO Hank</i> GC: 11 participantes. Entrenamiento que incluía movilización analítica, ejercicios de fuerza para extremidades inferiores y reeducación de la marcha en paralelas (si era posible)	Ambos grupos realizaron 3 sesiones de entrenamiento (30 minutos) por semana durante 5 semanas (15 sesiones en total)
-------------------------------------	---	---	--

Abreviaturas: LM: Lesión medular; GI: grupo intervención; GC: grupo control; *EXO*: exoesqueleto; *BWS*: *Body Weight Support* (soporte de peso corporal), *OG*: *overground* (sobre el suelo); *BWSTT*: *Body Weight Supported Treadmill Training* (entrenamiento en cinta con soporte de peso corporal); G *EXO*: grupo exoesqueleto; G *CA*: grupo Control Activo; G *CP*: grupo control pasivo; E1: entrenamiento 1; E2: entrenamiento 2.

Tabla 2. Medidas y resultados de las diferentes variables

ID	Variables	Instrumentos	Resultados
<i>Edwards et al.</i> (2022) (31)	– Velocidad marcha – Movilidad funcional y equilibrio – Capacidad marcha – Deambulaci3n funcional (necesidad asistencia y dispositivos) – Seguridad – Carga trabajo terapeuta	– <i>10MWT</i> – <i>TUG</i> – <i>6MWT</i> – <i>WISCI-II</i> – Registro eventos adversos – <i>TLX</i>	Los tres grupos obtuvieron mejoras en las variables de la marcha (<i>10MWT</i>, <i>TUG</i>, <i>6MWT</i>), sin diferencias significativas entre ellos. Ninguno de los pacientes de los tres grupos cambi3 de dispositivo de asistencia, exceptuando alguno del grupo exoesqueleto y grupo de control activo. Para todos los grupos el entrenamiento fue bien tolerado, con eventos adversos leves. Respecto a la carga de trabajo del terapeuta, solo se observ3 mejora significativa en el par3metro de frustraci3n en el grupo de control activo.
<i>Xiang XN et al.</i> (2022) (29)	– Funci3n pulmonar – Funci3n motora – Fuerza muscular – Espasticidad – Seguridad	– Espir3metro – <i>TCT</i> – <i>LEMS</i> – Tasa de eventos adversos	La funci3n pulmonar mejor3 en ambos grupos, obteni3ndose mejoras significativas en varios par3metros en GI respecto a GC. La funci3n motora (<i>TCT</i>), la fuerza muscular (<i>LEMS</i>) y la espasticidad (<i>MAS</i>) mejor3 en ambos grupos, sin diferencias significativas entre ellos. Ambos entrenamientos fueron seguros.

	– Grosor cartilago articulación rodilla – DMO articulación cadera – ABVD – Seguridad – Capacidad marcha – Velocidad marcha	– <i>MAS</i> (en extremidades inferiores) – Ecografía – Rayos X (absorción) – Índice de <i>Barthel</i> modificado – <i>6MWT</i> – <i>10MWT</i>	El GI obtuvo un efecto más favorable en la protección del cartilago respecto a GC, sin observarse mejoras en la DMO de la articulación de la cadera. Se registraron mejoras en las ABVD, siendo estas más significativas en GI. En el grupo intervención se registraron correlaciones significativas entre las pruebas de <i>6MWT</i> y <i>10MWT</i> y los parámetros ventilatorios, mientras que no se encontraron correlaciones significativas con <i>TCT</i>.
<i>Rodríguez-Fernández et al. (2022) (27)</i>	– Capacidad marcha – Velocidad marcha – Movilidad funcional y equilibrio – Consumo energético – Satisfacción – Impacto psicosocial	– <i>6MWT</i> – <i>10MWT</i> – <i>TUG</i> – Calorimetría indirecta con sistema portátil de análisis de gases – <i>QUEST 2.0</i> – <i>PIADS</i>	Ambos grupos obtuvieron mejoras significativas en las pruebas de <i>6MWT</i>, <i>10MWT</i> y <i>TUG</i>, sin diferencias entre ambos dispositivos. A partir de estas pruebas se analizaron parámetros cinemáticos y espaciotemporales obteniéndose resultados más significativos en el entrenamiento con exoesqueleto respecto al entrenamiento con ortesis <i>KAFO</i>. Ninguno de los entrenamientos resultó ser significativo en relación con el consumo energético. Tanto la satisfacción como el impacto psicosocial fueron positivos con ambos dispositivos.

<i>Hu X et al.</i> (2024) (30)	– Calidad de vida – Independencia funcional	– <i>WHOQOL-BREF</i> – <i>SCIM-III</i>	No hay mejoras significativas respecto a la calidad de vida en ningún grupo. En el GI tampoco hubo mejoras significativas respecto a independencia funcional, al contrario que en GC, que si existieron mejoras significativas.
<i>Khadour et al.</i> (2026) (21)	– Seguridad – Úlceras – Dolor y fatiga – Fuerza muscular – Rendimiento marcha – Velocidad marcha – Movilidad funcional y equilibrio – Capacidad marcha – Deambulaci3n funcional (necesidad asistencia y dispositivos) – Independencia funcional	– Registro eventos adversos – Inspecci3n cutánea y clasificaci3n segun <i>NPUAP/EPUAP</i> – EVA – <i>LEMS</i> – <i>10MWT</i> – <i>TUG</i> – <i>6MWT</i> – <i>WISCI-II</i> – <i>SCIM-III</i>	No se registraron eventos adversos importantes, a excepci3n de algun leve enrojecimiento. Dolor y fatiga tolerable. Ambos grupos mejoraron fuerza muscular (<i>LEMS</i>), parámetros relacionados con el rendimiento de la marcha (<i>10MWT</i>, <i>TUG</i>, <i>6MWT</i>) e independencia funcional (<i>SCIM-III</i>), pero sin diferencias significativas entre ellos. Únicamente se observó una mejora significativa del GI respecto al GC en la capacidad de marcha (<i>WISCI-II</i>).

<i>Yildirim et al.</i> (2019) (20)	– Deambulaci3n funcional (necesidad asistencia y dispositivos) – Independencia funcional	– <i>WISCI-II</i> – <i>FIM</i>	Ambos grupos obtuvieron una mejora significativa en las puntuaciones de <i>WISCI-II</i> y <i>FIM</i> , siendo mejores las registradas en GI.
<i>Gil Agudo et al.</i> (2023) (28)	– Seguridad – �lceras – Dolor y fatiga – Fuerza muscular – Velocidad marcha – Movilidad funcional y equilibrio – Capacidad marcha – Deambulaci3n funcional (necesidad asistencia y dispositivos) – Independencia funcional	– Registros eventos adversos – Inspecci3n cutánea y clasificaci3n según <i>NPUAP/EPUAP</i> – EVA – <i>LEMS</i> – <i>10MWT</i> – <i>TUG</i> – <i>6MWT</i> – <i>WISCI-II</i> – <i>SCIM-III</i>	No se observaron efectos adversos graves y solo algún leve problema cutáneo. Dolor y fatiga tolerables. Se observaron mejoras significativas en la fuerza muscular (<i>LEMS</i>) en los dos grupos, sin diferencias entre ellos. Ambos grupos obtuvieron mejoras en las variables de la marcha (<i>10MWT</i>, <i>TUG</i>, <i>6MWT</i>, <i>SCIM-III</i>), siendo el <i>WISCI-II</i> el único que mejoro significativamente en GI respecto a GC.

Abreviaturas. *NPUAP*: panel consultivo nacional de úlceras por presión; *EPUAP*: panel consultivo Europeo de úlceras por presión; *EVA*: escala visual analógica; *LEMS*: puntuación motora de extremidades inferiores; *10MWT*: prueba de diez metros marcha; *TUG*: *timed up and go* (prueba de levantarse y caminar); *6MWT*: prueba de marcha de seis minutos; *WISICI- II*: índice de marcha para lesión medular (2.^a versión); *SCIM-III*: medida de independencia de la médula espinal-III (3.^a versión); *GI*: grupo intervención; *GC*: grupo control ; *TLX*: índice de carga de tarea; *DMO*: densidad mineral ósea; *ABVD*: actividades básicas de la vida diaria; *TCT*: test de control de tronco; *MAS*: escala modificada de *Ashworth*; *QUEST 2.0*: evaluación de la satisfacción del usuario con tecnología de ayuda; *PIADS*: escala de impacto psicosocial de dispositivos de ayuda; *WHOQOL-BREF*: cuestionario breve de calidad de vida de la OMS; *FIM*: medida de independencia funcional

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

D./D^a. OLGA DUEÑA LOZANO, con DNI/NIE 

He leído y comprendido la normativa vigente sobre el empleo de inteligencia artificial (IA) en los Trabajos de Fin de Grado (TFG) de la Facultad de Enfermería y Fisioterapia de la Universidad de Salamanca.

Declaro que:

☐ No he utilizado ninguna herramienta de IA en la elaboración de este TFG.

☒ He utilizado herramientas de IA en la elaboración de este TFG, y las detallo a continuación:

Herramienta utilizada: Google Gemini

Finalidad/es del uso: Se ha utilizado la herramienta como apoyo para la traducción de párrafos y para sugerencias de conectores y expresiones para mejorar la fluidez del texto.

Contenido/s generado/s y apartado/s donde se ubica/n: Abstract y discusión

(Añadir tantos campos como herramientas se hayan empleado)

He revisado, editado y validado todo el contenido generado con dichas herramientas. Asumo la plena responsabilidad sobre su exactitud, originalidad y adecuación a los requisitos académicos.

Fecha: 09/06/2026

Firma:

