

Artículo de Revisión

# Exoesqueletos portables en personas con lesión medular. Revisión sistemática

Laura Gema Fernández Álvarez <sup>1</sup>, Susana Núñez Nagy <sup>2,\*</sup>, y Roberto Cano de la Cuerda <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pabellón materno-infantil, Hospital Universitario Gregorio Marañón

<sup>2</sup> Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universidad de Alcalá; <https://orcid.org/0000-0001-9206-6725>

<sup>3</sup> Departamento de Fisioterapia, Terapia Ocupacional, Rehabilitación y Medicina Física. Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Rey Juan Carlos, Alcorcón, Madrid; <https://orcid.org/0000-0002-1118-4234>

\* Autor correspondencia: [susana.nunez@uah.es](mailto:susana.nunez@uah.es)

DOI: <https://doi.org/10.37536/RIECS.2020.5.1.194>

Recibido: 24/02/2020; Aceptado: 05/03/2020; Publicado: 30/05/2020

---

**Resumen:** 1) Antecedentes: existe gran cantidad de dispositivos para facilitar la bipedestación y la marcha. Cada exoesqueleto tiene características propias, beneficios y limitaciones. Esta revisión compendia y ordena el conocimiento disponible sobre los diferentes tipos de exoesqueletos portables para personas con lesión medular. 2) Métodos: se realizó una búsqueda sistemática en *Pubmed*, *Cochrane Library* y *Physiotherapy Evidence Database*, sin limitación de tipo de artículo. Además, se analizaron los artículos que figuraban en su bibliografía y se consultaron páginas web relacionadas. 3) Resultados: de un total de 128 estudios se seleccionaron 28. Se recogieron datos sobre el nombre del dispositivo y empresa distribuidora, población diana, articulaciones diana, nivel lesional, uso indicado, tipo de terapia, necesidad de ayudas técnicas, autonomía y comercialización. 4) Conclusiones: se han encontrado 20 exoesqueletos portables que se utilizan por personas con lesión medular. La mayor parte de articulaciones diana son la cadera y la rodilla. La mayoría se emplean con fines rehabilitadores y necesitan un producto de apoyo complementario.

**Palabras Clave:** Rehabilitación, Traumatismos de la médula espinal, Dispositivo exoesqueleto, Tecnología Biomédica, Revisión Sistemática.

**Abstract:** 1) Background: there are many devices to facilitate standing and walking. Each exoskeleton has its characteristics, benefits, and limitations. This review summarizes and orders the available knowledge about the different types of portable exoskeletons for people with spinal cord injury. 2) Methods: a systematic search was conducted in *Pubmed*, *Cochrane Library*, and *Physiotherapy Evidence Database*, without limitation of the type of article. Also, the articles in their bibliography were analyzed, and related web pages were consulted. 3) Results: from a total of 128 studies, 28 were selected. Data were collected on the name of the device and distribution company, target population, target joints, injury level, indicated use, type of therapy, need for technical assistance, autonomy, and commercialization. 4) Conclusions: 20 portable exoskeletons have been found that are used by people with spinal cord injury. Most of the target joints are the hip and the knee. Most are used for rehabilitation purposes and need a complementary support product.

**Key words:** Rehabilitation, Spinal cord injuries, Exoskeleton device, Biomedical technology, Systematic review.

---

## 1. Introducción

La médula espinal es un cordón nervioso que forma parte del Sistema Nervioso Central y que se extiende desde el *foramen magnum* hasta la zona lumbar. Se encuentra alojada en el canal vertebral siendo un elemento indispensable para transmitir e integrar la información sensitiva y motora entre el cerebro y el resto de las estructuras somáticas y viscerales, además de enviar las órdenes que regulan los movimientos. Cuando se produce una lesión medular (LM) la conexión nerviosa se ve interrumpida o alterada de forma temporal o permanente ocasionando una disfunción motora, sensitiva o autonómica, de modo que puede presentar parálisis de la movilidad voluntaria, ausencia de sensibilidad por debajo de la zona afectada, falta de control de esfínteres, problemas respiratorios, trastornos en el campo de la sexualidad y fertilidad, alteraciones del Sistema Nervioso Vegetativo y riesgo de sufrir otras complicaciones (úlceras por decúbito, espasticidad, osteoporosis o alteraciones renales, entre otros) [1].

La LM se clasifica según la localización, extensión y afectación sensitivo-motora empleando la Escala ASIA (*American Spinal Injury Association*) [2], siendo la escala más empleada con el fin de unificar su nomenclatura a nivel mundial. La localización vendrá determinada por el nivel lesional, la extensión puede ser variable y determinará si se trata de una lesión completa (ASIA A) o incompleta (ASIA B, C, D) o normal (E) y la afectación sensitivo-motora está definida por: 1) dos niveles sensitivos, donde se comprobará el tacto leve y la sensación de pinchazo en 28 puntos clave. 2) dos niveles motores (derecho e izquierdo), donde se comprobará bilateralmente la fuerza de diez músculos claves. 3) un nivel neurológico, corresponderá al motor y sensitivo preservado en lesiones simétricas; mientras que en lesiones asimétricas se establecerá el nivel más alto, ya sea motor o sensitivo [3,4].

La LM conllevará disfunciones sensitivo-motoras por debajo del nivel lesional, que variarán en función de dicho nivel y del grado de sección (completa o incompleta) [5,6], ocasionando un impacto significativo en el individuo al reducir su movilidad e independencia, y reduciendo así su calidad de vida [7-9]. De este modo, se considera tetraplejía a la afectación de los segmentos cervicales provocando alteraciones en miembros superiores (MMSS), tronco, miembros inferiores (MMII) y órganos pélvicos. Por otro lado, se considera paraplejía a la afectación medular de segmentos dorsales, lumbares y sacros que, dependiendo del nivel de la lesión, quedarán afectados tronco, extremidades inferiores y órganos pélvicos.

La incidencia mundial de la LM, tanto traumática como no traumática, se sitúa entre 250.000 y 500.000 personas al año [10,11]. Pese a que no existen datos concretos acerca de la prevalencia en la LM, son varios estudios los que muestran una cifra que oscila entre los 223 y los 755 casos por millón de habitantes [4]. En base a la etiología, la Organización Mundial de la Salud estableció en 2011 como primera causa de LM el trauma asociado a accidentes de tráfico, seguido de las caídas de altura. En segunda instancia, situó a las lesiones no traumáticas asociadas a factores congénitos, infecciosos, neoplásicos, vasculares, autoinmunes, inflamatorios, desmielinizantes, idiopáticos e iatrogénicos [2]. El 53% de las lesiones medulares son incompletas y aproximadamente el 25% de estas no consiguen una marcha funcional [11], dependiendo, en determinadas ocasiones, incluso de una silla de ruedas [12].

En los últimos diez años, los avances en neurorrehabilitación asociados a tecnologías han lanzado al mercado diversos dispositivos robóticos portables de tipo exoesqueleto, definidos como dispositivos mecánicos compuesto por palancas que se ajustan estrechamente al cuerpo del usuario y que trabajan en conjunto asistiendo y compensando los movimientos de éste, pudiendo ser portables o no, empleados en los programas de rehabilitación de la marcha en pacientes con LM como complemento terapéutico [4,13] proporcionándoles mayor independencia y lográndose un aumento de la funcionalidad del miembro inferior [7,14]. Tales exoesqueletos pueden ser empleados para la bipedestación y la marcha, no sólo en los programas de actividad física durante el proceso de rehabilitación, sino también en la comunidad. Su uso favorece potencialmente a nivel musculoesquelético, cardiorrespiratorio, endocrino y metabólico [18], además de estimular la plasticidad cortical [16], pero en la mayoría de los casos implica el consumo de altos niveles de energía

para lograr velocidades mínimas de marcha y no funcionales, que variarían dependiendo del nivel de LM [12].

En la actualidad, existen diversos exoesqueletos que han sido diseñados y comercializados para la persona con LM, como Ekso GTTM<sup>®</sup>, ReWalk<sup>TM</sup> o Indego<sup>TM</sup> que cubren todo el miembro inferior, tratándose de sistemas con articulaciones motorizadas que permiten, mediante sensores, el control del dispositivo robótico durante la actividad seleccionada (caminar, levantarse o sentarse). Cada exoesqueleto aporta sus peculiaridades, beneficios y limitaciones precisando o no productos de apoyo para la marcha [7,15]. El uso de dispositivos o productos de apoyo (muletas, bastones y/o corsés, -entre otros-) supone proporcionar ciertas estrategias compensatorias. Sin embargo, existen gran cantidad de dispositivos por lo que resulta necesario revisar y ordenar el conocimiento disponible sobre los diferentes tipos de exoesqueletos portables destinados a personas con LM.

El objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática sobre los tipos de exoesqueletos portables para personas con LM, ya sean destinados a adultos o niños, proporcionando una clasificación y descripción de las características principales de los distintos sistemas, método de aplicación, las articulaciones diana involucradas, así como sus características técnicas.

## 2. Material y Métodos

### 2.1. Estrategia de búsqueda

Se presenta una revisión sistemática sobre dispositivos robóticos portables de tipo exoesqueleto de miembro inferior para personas con LM, tanto pediátricos como adultos. Para garantizar la adecuada calidad metodológica del presente trabajo se siguieron los criterios PRISMA [17] (Tabla I) para revisiones sistemáticas. Dos autores realizaron de forma independiente las búsquedas en las bases de datos, analizaron los títulos y resúmenes de los estudios, y decidieron si cumplían los criterios de elegibilidad. Cuando hubo discordancia se resolvió mediante un tercer autor independiente.

**Tabla I** Declaración PRISMA. N/A: no aplicable

Sección/tema	Nº ítem	Ítem de la lista de verificación	Página
<b>Título</b>			
Identificación	1a	Identificar el documento como protocolo de una revisión sistemática	Portada
Actualización	1b	Si el protocolo está destinado a una actualización de una revisión previa, identificarlo como tal.	N/A
<b>Registro</b>	2	Si está registrado, proporcionar el nombre del registro (p.ej: PRÓSPERO) y el número del registro	N/A
<b>Autores</b>			N/A
Contacto	3a	Proporcionar nombre, afiliación institucional y dirección de correo electrónico de todos los autores del protocolo, aportar la dirección postal del autor para la correspondencia.	N/A
Contribuciones	3b	Describir las contribuciones de los autores del protocolo e identificar al responsable de la revisión.	N/A
<b>Correcciones</b>	4	Si el protocolo supone una corrección de un protocolo completado previamente o publicado, identificarlo como tal y enumerar la lista de cambios; en caso contrario, declarar la estrategia para documentar las correcciones importantes del protocolo.	N/A

<b>Apoyo</b>			N/A
Fuentes	5a	Identificar fuentes de financiación de la revisión sistemática	N/A
Patrocinador	5b	Aportar el nombre del financiador o patrocinador de la revisión.	N/A
Papel del patrocinador/ financiador	5c	Detallar el papel desempeñado por del (los) financiador(es), patrocinador(es), y/o institución(es) , si los hay, en la elaboración del protocolo.	N/A
<b>INTRODUCCIÓN</b>			
<b>Justificación</b>	6	Describir la justificación de la revisión en el contexto de lo que ya se conoce sobre el tema.	3-4
<b>Objetivos</b>	7	Plantear de forma explícita las preguntas que se desea contestar en relación con los participantes, las intervenciones, las comparaciones y desenlaces o resultados (PICO).	5
<b>MÉTODOS</b>			
<b>Criterios de elegibilidad</b>	8	Especificar las características de los estudios (p. ej. PICO, diseño del estudio, contexto, duración del seguimiento) y detallar las características (p.ej. años abarcados, idioma o estatus de publicación) utilizadas como criterios de elegibilidad para la revisión.	5-6
<b>Fuentes de información</b>	9	Describir con las fechas de cobertura previstas, todas las fuentes de información (p.ej. bases de datos y periodos de búsqueda, contacto con los autores de los estudios, registro de los estudios y otras fuentes de literatura gris).	5-6
<b>Estrategia de búsqueda</b>	10	Presentar el borrador de la estrategia de búsqueda que será utilizado en al menos una base de datos electrónica, incluyendo límites propuestos de manera que pueda repetirse.	25
<b>Registro de estudios</b>			
Gestión de datos	11a	Detallar los mecanismos que se utilizarán para gestionar los datos y los registros durante la revisión sistemática.	N/A
Proceso de selección	11b	Exponer el proceso que se utilizará para seleccionar los estudios (p.ej. dos revisiones independientes) en cada fase de la revisión (es decir: cribado, elegibilidad o inclusión en un metaanálisis)	5-6
Proceso de extracción de datos	11c	Describir el método planteado para la extracción de datos de las publicaciones (p. ej. uso de formularios para la extracción uniforme de datos -piloting forms-, por duplicado y de forma independiente) y cualquier proceso destinado a la obtención y confirmación de los datos por parte de los investigadores.	5-6
<b>Lista de datos</b>	12	Enumerar y definir todas las variables para las que se buscarán datos (p. ej. PICO, fuente de financiación) y cualquier asunción o simplificación de dichos datos planeada de antemano.	N/A
<b>Resultados esperados y priorización</b>	13	Enumerar y detallar todos los desenlaces o resultados esperados para los que se buscarán datos, incluyendo la priorización y justificación de los resultados principales y los adicionales.	6-13

<b>Riesgo de sesgo en los estudios individuales</b>	14		
<b>DATOS</b>			
<b>Síntesis</b>	15a	Describir los criterios que permitirán sintetizar cuantitativamente los datos de los resultados.	N/A
	15b	Si los datos son adecuados para su síntesis cuantitativa, describir las medidas planificadas para resumirlos, métodos de tratamiento de datos y métodos de combinación de datos, incluyendo cualquier análisis de consistencia interna (p. ej. 12, tau de Kendall).	N/A
	15c	Detallar todo análisis adicional propuesto (p. ej. sensibilidad o análisis de subgrupo, metarregresión).	N/A
	15d	Si la síntesis cuantitativa no resulta adecuada, describir el tipo de resumen de datos planificado.	N/A
<b>Metasesgo(s)</b>	16	Especificar todas las evaluaciones metasesgo(s) planificadas (p.ej. sesgo de publicación entre los diferentes estudios, la presentación de información selectiva en los estudios).	N/A
<b>Confianza en la evidencia acumulada</b>	17	Describir de que manera se evaluará la solidez del conjunto de pruebas (evidencia) (p. ej. GRADE)	N/A

La búsqueda se realizó utilizando las bases de datos: *Pubmed*, *Cochrane Library* y *Physiotherapy Evidence Database* (PEDro), empleando como palabras clave: “spinal cord injuries”, “exoskeleton”, “lower extremity”, “neurological rehabilitation”, “gait”, “robotics”, “robotic engineering” y “neuronal plasticity”, además de la combinación de las mismas con los operadores booleanos AND y OR. En dicha estrategia de búsqueda se introdujeron como límites aquellos estudios de investigación publicados entre 2008 y 2018, realizados sólo en seres humanos adulto y/o niños, escritos en inglés o castellano (Tabla II). De los resultados de la búsqueda se analizaron también los artículos que figuraban en su bibliografía y se consultaron páginas web relacionadas con los dispositivos descritos para así completar la información obtenida.

**Tabla II** Estrategias de búsqueda

<b>Pubmed</b>	<b>Cochrane Library</b>	<b>PEDro</b>
#1 “spinal cord injuries” [MeSH Terms]	#1 “spinal cord injuries”	#1 “spinal cord injuries”,
#2 “exoskeleton” [All Fields]	#2 “exoskeleton”	“exoskeleton”, “gait”,
#3 “lower extremity” [MeSH Terms]	#3 “lower extremity”	“rehabilitation”
#4 “gait” [MeSH Terms]	#4 “neuronal plasticity”	#2 “spinal cord injuries”,
#5 “robotics” [MeSH Terms]	#5 “rehabilitation”	“exoskeleton”, “robotics”
#6 “neuronal plasticity” [MeSH Terms]	#6 #1 AND #2 AND #3	
#7 “neurological rehabilitation” [MeSH Terms]	#7 #1 AND #2 AND #5	-----
	#8 #1 AND #4	<i>Número de resultados en PEDro: 2</i>
#8 “robotic engineering”	#9 Limit TO published date from 2008/01	
#9 #1 AND #2 AND #3 AND #4 AND #5	to 2018/01 AND languages: English,	
#10 #1 AND #4 AND #6	Spanish AND child health.	

<p>#11 #1 AND #2 AND #3 AND #4 AND #5 AND #7</p> <p>#12 #1 AND (#2 OR #5)</p> <p>#13 #1 AND #2 AND #4 AND #8</p> <p>#14 Limit TO type document AND published date from 2008/01/01 to 2018/01/01 AND languages: English, Spanish AND child: birth – 18 years.</p> <p>#15 Limit TO type document AND published date from 2008/01/01 to 2018/01/01 AND languages: English, Spanish AND adult: 19 + years.</p> <p>-----</p> <p><i>Número de resultados obtenidos en Pubmed: 24</i></p>	<p>#10 Limit published date from 2008/01 to 2018/01 AND languages: English, Spanish AND neurology.</p> <p>-----</p> <p><i>Número de resultados en Cochrane Library: 2</i></p>	
--	---	--

2.2. *Criterios de inclusión y exclusión*

Los criterios de exclusión fueron aquellos estudios que hubieran evaluado a personas con diagnóstico distinto a la LM; estudios cuyos pacientes presentaran diagnóstico mixto; estudios que emplearán exclusivamente dispositivos no portátiles; y estudios que emplearan estimulación eléctrica funcional (FES), ya fuese integrada o no en el dispositivo robótico a modo de neuroprótesis.

Para los estudios finalmente incluidos en la presente revisión, se examinaron los títulos y los resúmenes, y se evaluaron aquellos estudios relevantes para su inclusión al objeto de obtener la siguiente información técnica de cada dispositivo: nombre del dispositivo y empresa distribuidora, población (pediátrica o adultos con LM), nivel de LM, articulaciones diana, grados de libertad del dispositivo, si presenta un uso específico en pacientes con LM y necesidad de uso con productos de apoyo adicionales.

**3. Resultados**

Se identificaron un total de 128 estudios, de los cuales se seleccionaron 28 para la presente revisión sistemática, teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. Todo el proceso de selección queda reflejado en el diagrama de flujo (Figura 1).

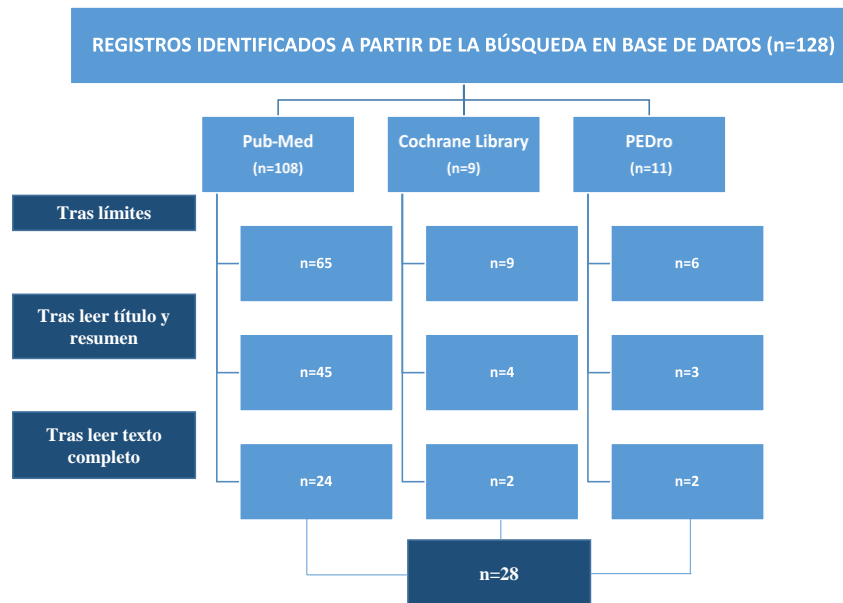


Figura 1 Diagrama de flujo.

En relación con los dispositivos robóticos portables de tipo exoesqueleto de miembro inferior para pacientes con LM, se identificaron un total de 20 dispositivos de los cuales 14 de ellos se encuentran disponibles en el mercado para su uso en rehabilitación y/o en la comunidad, y sólo 3 se pueden emplear en población infantil. Dos de ellos, Exo-H2 e IndegoTM ofrecen la opción de añadir FES de manera adicional al exoesqueleto, aunque pueden ser utilizados sin FES igualmente. Toda la descripción técnica de los robots portables se muestra, por orden alfabético, en la Tabla III.

- **ArkeTM** [18]. Exoesqueleto de tren inferior que presenta motores en el plano sagital a nivel de cadera y rodilla para la facilitar la rehabilitación de la marcha. Gracias a una colaboración con IBM y su tecnología IBM Cloud presenta la peculiaridad de utilizar sofisticados algoritmos de aprendizaje automático. El movimiento del exoesqueleto generalmente se controla mediante una aplicación en una tablet o reaccionando automáticamente a los movimientos de los usuarios. Los sensores dispuestos en el exoesqueleto detectan cuando el usuario cambia la transferencia de peso, activando los motores en la mochila que ayudan al movimiento. En función del nivel lesional los usuarios pueden trabajar contra resistencia gracias a la información proporcionada por sus sensores. Amazon ha planteado la herramienta Alexa como posible complemento del exoesqueleto al permitir otorgar al individuo la capacidad de control mediante la voz. El exoesqueleto ArkeTM se encuentra en fase de pruebas, por lo que su uso clínico aún no está aprobado. No ha sido hallado ni el nivel lesional, ni la altura y peso para los cuales es más idóneo el uso del dispositivo.
- **Atalante** [19]. Exoesqueleto completamente autónomo que simula el movimiento natural al contar con 12 grados de libertad, con motores en cadera, rodilla y tobillo, sin requerir productos de apoyo adicionales. Los usuarios con movilidad reducida, entre ellos LM con paraplejas completas -LM nivel alto, no determinado ni peso ni altura del usuario-, son unos candidatos idóneos para su uso. Presenta controles intuitivos sin joystick, usando un chaleco sensor y está programado para sortear obstáculos. Los primeros ensayos clínicos para validar la capacidad del exoesqueleto para ponerse de pie, caminar y sentarse con seguridad del usuario fueron llevados a cabo en 2017. En 2018 se evaluó su capacidad para la rehabilitación de la marcha. Es uno de los primeros robots dinámicos para caminar que se comercializan en serie,

- exclusivamente en el ámbito de la rehabilitación y que se plantea como la opción inicial para la marcha, al proporcionar asistencia adaptativa o parcial, siendo un exoesqueleto más ligero.
- **Axosuits** [20]. Exoesqueleto de tren inferior para lesiones bajas de la médula espinal empleado en la rehabilitación de la marcha. Presenta 27 grados de libertad, 17 pasivos y 10 activos, distribuidos entre muñeca, codo, hombro, cadera, rodilla y pie, siendo relevantes en el tren inferior los movimientos de flexo-extensión en cadera y rodilla. Precisa un andador posterior para alcanzar el punto de equilibrio, con un peso máximo del individuo de  $\leq 125\text{kg}$  y una altura entre 150-210 cm de altura. El esqueleto ofrece múltiples niveles de apoyo funcional e incluye un sistema de soporte pasivo incorporado para mayor seguridad.
  - **Berkeley Lower Extremity Exoskeleton -BLEEX-** [13,14,21]. Este exoesqueleto fue creado para brindar a equipos humanos la capacidad de transportar cargas importantes, sin esfuerzo, en cualquier tipo de terreno en menor intervalo de tiempo. Una vez se comprobó su utilidad mejorando la fuerza y la resistencia en sujetos sanos, se planteó la posibilidad de ser empleado en soldados que presentaban alteraciones de la movilidad tras los conflictos bélicos. El exoesqueleto presenta sensores y motores de forma bilateral en cadera (3 grados de libertad), rodilla (1 grado de libertad) y tobillo (3 grados de libertad), y da la opción de ser desmontado de forma modular en función de las necesidades del usuario.
  - **CUHK-EXO** [13,22]. Exoesqueleto con sistema multisensor portable mediante mochila, con sensores de presión en plantillas que indican de la postura del tronco, además de unas muletas específicas que detectan el contacto del pie del usuario con el suelo. Con esta información se puede calcular el centro de gravedad del usuario en tiempo real y estimar la intención de movimiento. El exoesqueleto permite levantarse, sentarse y caminar, y dispone de motores de forma bilateral en cadera y rodilla dispuestos en el plano sagital, mientras que el movimiento de la articulación del tobillo es pasivo. Su uso está recomendado en pacientes con desórdenes de la movilidad, accidentes cerebrovasculares y LM, aunque en estos últimos no se ha hallado el nivel lesional adecuado para ser empleado, ni se recoge el peso ni la altura que permite tal dispositivo.
  - **Ekso GTTM** [14,16,23,24]. Exoesqueleto que se presenta como una evolución de eLEGSTM. Se trata de un dispositivo exclusivo para rehabilitación que puede ser empleado en pacientes con LM entre 152 y 193cm de altura y con un peso  $\leq 100\text{kg}$ , incluso con niveles de C7 ASIA D, con función motora de 4/5 en MMSS. El mecanismo de acción del sistema contempla que el terapeuta accione el inicio del paso pulsando un botón (control externo), activándose dicho paso cuando el dispositivo detecta la transferencia de carga de un miembro inferior a otro. Para ello intervienen los motores dispuestos bilateralmente en cadera y rodilla. La batería se porta en una mochila. El dispositivo, con sus 23kg de peso, no permite subir escaleras ni la realización de deporte, pero sí ponerse de pie, sentarse y caminar.
  - **eLEGSTM** [14,25]. Exoesqueleto que presenta dos motores bilaterales en caderas y rodillas. Fue creado en 2010, pero nunca llegó a comercializarse como tal. Apareció en el mercado como Ekso GTTM en 2011.
  - **ExoAtlet® I** [26]. Exoesqueleto que puede ser empleado con y sin FES en aquellos usuarios de entre 160-190 cm de altura y un peso  $\leq 100\text{kg}$  que hayan perdido la función total o parcial de los miembros inferiores, ya sea por LM u otras condiciones patológicas, siempre y cuando posean en extremidades superiores la suficiente fuerza para apoyarse en muletas. Los botones para controlar el dispositivo se encuentran en los mangos de las muletas. El sistema de control se basa



en sensores de fuerza, situados en los pies mediante plantillas, y electromiografía. El robot permite sentarse, levantarse y subir y bajar escaleras con una autonomía de 6 horas gracias a los motores que presenta de forma bilateral en cadera y rodilla. Se ha descrito un periodo de dos semanas para la correcta adaptación usuario-exoesqueleto. Posteriormente, podría ser empleado por el propio usuario en la comunidad.

- **Exo-H2** [7,27]. Exoesqueleto de tren inferior que puede emular completamente la locomoción de un individuo entre 145-195 cm de altura y un peso  $\leq 100$  kg, con LM y/o accidente cerebrovascular. Está compuesto por 6 motores dispuestos en el plano sagital en las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo de forma bilateral, sensores articulares y sensores de presión en los pies, tanto en talón como en punta. Se pueden emplear o no productos de apoyo en función de la afectación motora del usuario. Este exoesqueleto está diseñado con una arquitectura abierta, la cual permite al clínico modificar los parámetros de control del sistema para ajustarlo a las necesidades del paciente.
- **Hank** [28]. Se trata de la primera empresa europea en recibir la aprobación de Conformidad Europea para un exoesqueleto de uso médico. El exoesqueleto está enfocado a la rehabilitación y se dirige a usuarios con LM, daño cerebral adquirido y enfermedades neurodegenerativas. Se trata de un exoesqueleto con asistencia para la marcha, con control independiente en cada articulación y que incluye la posibilidad de controlar los movimientos con señales de electroencefalografía. Su estructura presenta motores en cadera, rodilla y tobillo a nivel bilateral, para controlar los movimientos del plano sagital en todas ellas, y dos motores adicionales en cada cadera para los planos frontal y transversal. Está diseñado para a caminar, sentarse, pararse, subir y bajar rampas de inclinación moderada y escaleras, precisando el uso de muletas. Desde un punto de vista de control, el dispositivo adapta su grado de asistencia según la necesidad y el movimiento predefinido. Además, puede conectarse a una computadora o una aplicación móvil. Esta interfaz se puede usar tanto para ingresar parámetros operativos como la velocidad y la fuerza, así como para extraer datos de rendimiento tanto del exoesqueleto como del usuario.
- **Hanyang Exoskeleton Assistive Robot -HEXAR-HL35 Exoskeleton-** [13,29]. Exoesqueleto de extremidades inferiores con 15 grados de libertad, de los cuales presenta 7 en cada extremidad inferior y uno en la articulación de la cintura. Sólo los movimientos del plano sagital de cadera y rodilla son accionados por motores eléctricos. Este exoesqueleto está compuesto por un módulo de arnés del torso central, un módulo de articulación de la cadera, un módulo de articulación de la rodilla y un módulo de articulación del tobillo. El módulo del arnés del torso conecta el exoesqueleto al paciente. Con un mecanismo de fuerza constante, el módulo de articulación de la cadera soporta el peso del sistema de exoesqueleto superior y su carga. El módulo de articulación del tobillo soporta el peso total del sistema de exoesqueleto y proporciona una fuerza de propulsión para caminar con su propia deformación elástica a través de la energía potencial. El usuario puede caminar a una velocidad de 1,5 km/h cargando un peso de 40kg. Este exoesqueleto fue creado inicialmente con un fin militar para transportar cargas, pero se han realizado ensayos clínicos en individuos con lesión medular con un fin terapéutico no siendo concluyentes ni el nivel lesional idóneo para su uso ni los resultados.
- **H-MEX** [30]. Es un exoesqueleto de tren inferior dispuesto para la rehabilitación de la marcha de pacientes con LM baja, ofreciendo la capacidad de sentarse, levantarse, caminar, girar e

incluso subir y bajar escaleras. El dispositivo presenta motores en cadera y rodilla de forma bilateral, presentando movimientos en el plano sagital y frontal a nivel de cadera y movimiento sagital a nivel de rodilla. Calcula el ritmo de marcha del usuario, la longitud de su zancada y el ángulo de inclinación del torso para proporcionar un ajuste del modo de marcha individualizado. Está preparado para soportar 40 kg de peso del usuario y alcanzar una velocidad de 12 km/h.

- **Indego<sup>TM</sup>** [6,31]. Se trata de un dispositivo de 12 kg adaptable al usuario con LM que proporciona una retroalimentación continua. Se puede emplear en personas de entre 150-190 cm de altura y un peso  $\leq 113$ kg, y accionarse bien desde una aplicación móvil, bien mediante los controles que dispone el dispositivo. Dichos controles reflejan el movimiento humano - inclinación hacia anterior para la puesta en pie o marcha e inclinación hacia posterior para detenerte o sentarte-, aunque también se puede configurar de modo pasivo siendo el exoesqueleto el que iniciará el gesto. La aplicación de Indego<sup>TM</sup> permite desde el dispositivo móvil controlar el funcionamiento, cambiar la configuración y capturar los datos, determinando la longitud del paso, el ángulo de movimiento de la rodilla y la velocidad con la que el usuario avanza; permite la subida y bajada de rampas de poca inclinación, pero no de escaleras, ni la práctica deportiva. Una ventaja interesante es su diseño modular y ligero, ya permite la posibilidad de descomponerse en piezas más pequeñas para su traslado y puede ser fácilmente empleado tanto en superficies interiores como exteriores, pudiéndose usar incluso dentro de un automóvil. Para su idóneo funcionamiento, el dispositivo se activa bilateralmente a nivel de las articulaciones de cadera y rodilla y se une alrededor de la cintura mediante un cinturón pélvico que integra la batería, no precisando mochilas para su portabilidad.
- **Mina** [14,32]. El exoesqueleto en su versión Mina X1 y v1 presentan actuadores controlables bilateralmente en la cadera y rodilla para los movimientos de flexión y extensión. Al tiempo que de forma pasiva a nivel de cadera se permitirá abducción/aducción y rotación externa/interna. Las articulaciones motorizadas presentarán una impedancia que englobará el rango articular en su totalidad (0-100%). En su nueva versión, Mina v2, además de los actuadores motorizados ya mencionados en sus versiones Mina X1 y v1, se integra un motor bilateral en el tobillo con el fin de lograr una marcha más rápida y estable. Al tiempo que incluye sensores de presión en la planta del pie para medir dónde y qué cantidad de peso se presenta en cada pie. Actualmente, se están desarrollando nuevos algoritmos de equilibrio para que exista una retroalimentación bidireccional entre el robot y el usuario, de forma que el usuario pueda prescindir de las muletas. No ha sido hallado ni el nivel lesional, ni la altura y peso idóneos para el uso del dispositivo.
- **Phoenix** [16,33]. Presenta dos motores en las caderas y ajustes de tensión controlados eléctricamente que se tensan cuando el usuario está de pie y que oscilan libremente cuando el usuario está caminando. La rodilla está diseñada para facilitar la postura estática y evitar el impacto del pie con el suelo en la fase de oscilación. El exoesqueleto, al no aportar la estabilidad suficiente al usuario, precisará de unas muletas o andador vinculados, y será a través de unos botones dispuestos en dichos productos de apoyo desde donde el usuario controle el movimiento de cada miembro inferior; siendo posible caminar hasta 1,7 km/h. La batería tiene una autonomía de 4 horas si su uso es continuo u 8 horas si su uso es intermitente, y se transportará en una mochila teniendo un peso de 12,25 kg. Además, el usuario podrá vincular el exoesqueleto a un dispositivo móvil (smartphone o tablet) con el fin de ajustar el

funcionamiento del dispositivo. Este exoesqueleto está disponible para usuarios con un peso  $\leq 91$  kg y una talla de 160-187 cm de altura, y se oferta para adultos y niños, aunque los datos disponibles sobre la talla conllevan cierta controversia. Se encuentra en periodo de prueba, aunque en Europa se inició su comercialización en 2017.

- **Rewalk<sup>TM</sup>** [7,14,34]. Presenta la peculiaridad de permitir la subida y la bajada de escaleras, además de las funciones de levantarse, sentarse, pararse, girar y caminar, incluso en pacientes con LM incompleta de C7, con la función de MMSS preservada; además, destaca su velocidad de la marcha de 2,6 km/h. El dispositivo consta de una serie de sensores, por lo que si una inclinación hacia delante de la parte superior del cuerpo es detectada por el sistema se iniciará el primer paso. El cambio de peso corporal repetido genera una secuencia de pasos que imita una marcha natural funcional de los miembros inferiores, siendo el sensor pélvico el que detecta los cambios del centro de gravedad. El movimiento parte de los motores bilaterales dispuestos en cadera y rodilla. La batería está integrada en el cinturón pélvico de modo que no se precisa de mochila externa para su portabilidad. A todas herramientas se le añade un reloj que registra los datos de todos los movimientos que son llevados a cabo por el usuario. Está disponible para usuarios entre 160-190 cm de altura y con un peso  $\leq 100$  kg. ligero.
- **REX** [14,35]. Exoesqueleto que presenta 10 motores potentes para el desarrollo seguro del movimiento. Se controla con un joystick, un panel de mando, y posee una batería con 2 h de duración si el uso es continuado. Permite subir y bajar escaleras, sentarse y caminar hacia delante, hacia detrás y de lado. Su velocidad es lenta, 3 m/min, pero permite un avance seguro al usuario. Además, no necesita de medios auxiliares adicionales, como muletas, con lo que el usuario puede emplear sus extremidades superiores de forma libre. El nivel lesional idóneo para su uso no ha sido determinado, pero su diseño permite ser empleado en usuarios con graves afectaciones, siempre que midan entre 142-193 cm y pesen  $\leq 100$ kg. Presenta una serie de ejercicios, denominados rexercises que combinan posiciones estáticas y dinámicas para facilitar la actividad de los MMSS.
- **Roki** [36]. Se trata de un exoesqueleto con 6 grados de libertad (2 grados en plano sagital y frontal a nivel de cadera y 1 grado de libertad a nivel de rodilla) para la rehabilitación de la marcha en usuarios con LM entre T4-S3 que midan entre 150-198 cm de altura, pesen  $<101$  kg y tengan menos de 60 años. Al no proporcionar estabilidad completa al usuario, este precisa del uso de andador o muletas, lo cual exige un control óptimo de MMSS. Dichas ayudas técnicas (andador y/o muletas) están configuradas con el exoesqueleto. Permite levantarse, sentarse y caminar.
- **Tréxo Plus** [37]. Se trata del único exoesqueleto exclusivo para la población infantil con LM. Se ha empleado no sólo en pacientes con lesión medular sino también en parálisis cerebral, distrofias musculares, entre otros, siendo factible su uso en rehabilitación y en comunidad. Se trata de un exoesqueleto integrado en un arco-andador propio o que puede ser compatible con el andador Dynamic Rifton Pacer. El dispositivo permite en función de las necesidades del niño ajustar la cantidad de carga, el patrón de marcha, la velocidad del dispositivo y el nivel de asistencia. Se puede emplear de forma tanto pasiva, como activa. La función de asistencia activa podrá ser empleada por niños que tienen cierta capacidad para iniciar pasos o caminar. No se ha hallado el nivel idóneo de LM ni el peso ni la altura recomendables para su uso.
- **Wearable Power-Assist Locomotor -WPAL-** [12,14,38]. Exoesqueleto de tren inferior facilitador de marcha para la rehabilitación de usuarios con LM -no hallado el nivel de LM-, que presenten

entre 145-180 cm de altura y un peso  $\leq 80$  kg. Dispone de 6 motores para proporcionar los movimientos de flexión y extensión de caderas, rodillas y tobillos además de disponer de sensores de fuerza para un control adecuado de la marcha. Para mantener la postura erguida durante la marcha, se requiere soporte de MMSS con un andador anterior dotado de un acelerómetro y de un sensor láser de alcance que efectúa mediciones. Además de facilitar la marcha, permite sentarse, levantarse y estar de pie. Es necesario ajustar los parámetros de la marcha, como la longitud del paso, el período de la marcha, de acuerdo con el nivel de afectación y habilidades motoras del usuario.

**Tabla III** Dispositivos robóticos portables de tipo exosqueleto de miembro inferior para personas con Lesión Medular

Nombre del dispositivo (Empresa distribuidora)	Población diana	Articulaciones diana	Nivel lesional	Uso indicado	Tipo de terapia	Ayuda técnica	Autonomía	Comercialización (C) o en pruebas (P)
<b>Arke</b> (Bionik Laboratories Corporation + Wistron)	A	Cadera, rodilla -4 motores, plano sagital-	N/E	Rehabilitación	Pasivo, activo-asistido	Muletas	N/E	P
<b>Atalante</b> (WANDERCR AFT)	A	Cadera, rodilla y tobillo -12 motores-	Desde LM alta completa a L5	Rehabilitación	Pasivo, activo-asistido	No	N/E	C para rehabilitación. P para su uso en comunidad
<b>Axosuits</b> (AXOSUITS)	A	Cadera -2 motores, plano sagital, los planos transversal y frontal son pasivos-, rodilla -2 motores, plano sagital. Tobillo pasivo en planos sagital, frontal y transversal.	LM baja (N/E el nivel idóneo de LM)	Rehabilitación	Activo-asistido	Andador posterior	6 h (UC)	P
<b>Berkeley Lower Extremity Exoskeleton BLEEX-</b> (Berkeley Bionics)	A	Cadera -motores plano sagital, frontal y transversal-, rodilla -motor plano sagital- y tobillo -motor plano sagital,	N/E	Aumentar la fuerza	Activo-asistido	No	2 h (UC)	Uso de carácter militar, no comercializable.

		frontal y transversal-						
<b>CUHK-EXO</b> (Innovation and Technology Foundation)	A	Cadera -4 motores en plano sagital y frontal- y rodilla -2 motores en plano sagital Tobillo pasivo.	N/E	Rehabilitación	Pasivo o activo-asistido	Muletas específicas	5 h (UC)	P
<b>eExoskeleton Lower Extremity Gait System - eLEGS™</b> (Berkeley Bionics)	A	Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital-. Tobillo pasivo.	N/E	Rehabilitación	Activo-asistido	Muletas	6 h (UC)	No llegó a comercializarse. Se establecieron mejoras y pasó a comercializarse como Ekso GTM.
<b>Ekso GT™</b> (Ekso Bionics)	A	Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital-. Tobillo pasivo.	C7-T3 T4-L	Rehabilitación	Activo-asistido	Muletas	6 h (UC)	Comercialización, aprobado por Food and Drug Administration de los EEUU.
<b>ExoAtlet I</b> (Skolkovo)	A	Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital-.	N/E	Rehabilitación Comunidad	N/E	Muletas	4 h (UC)	C
<b>Exo-H2</b> (Technaid S.L)	N y A	Cadera, rodilla y tobillo -6 motores, plano sagital-.	LM incompleta (ASIA B, C y D)	Rehabilitación Comunidad	Activo-asistido	Muletas, personal cualificado o libre	6 h (UC)	C
<b>Hank</b> (GOGO A)	A	Cadera -3 motores, plano sagital, frontal y transversal-, rodilla -1 motor, plano sagital- y tobillo -1 motor, plano sagital-.	N/E	Rehabilitación	Activo-asistido	Muletas	4 h (UC)	C. Aprobado por Comunidad Europea
<b>Hanyang Exoskeleton</b>	A	15 grados de libertad,	N/E	Aumentar la fuerza	Activo-asistido	No	5-6 h (UC)	Uso de carácter

<b>Assistive Robot - HEXAR-</b> (Hanyang University)		presentando 7 en cada MMII y uno en la cintura. Presentando motores solo en el plano sagital de la cadera y de la rodilla.						militar, no comercializable.
<b>H-MEX</b> (Hyundai)	A	Cadera -2 motores, plano sagital y frontal- y rodilla – 1motor, plano sagital-.	LM baja	Rehabilitación	Activo-asistido	Muletas	4 h (UC)	C
<b>Indego™ o Vanderbilt exoskeleton</b> (Parker Hannifin Company)	A	Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital-. Tobillo pasivo.	C7-L5* T3-L5*  *completa o incompleta	Rehabilitación Comunidad	Pasivo, activo-asistido	Andador o muletas	4 h (UC)	Comercialización como Indego™
<b>Mina Exoskeleton</b> (Institute for Human and Machine Cognition)	A	Mina X1 y v1 → Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital-  Mina v2 → Cadera, rodilla y tobillo – 6 motores, plano sagital-	N/E	Rehabilitación Comunidad	Activo-asistido	Muletas	N/E	C
<b>Phoenix</b> (SuitX)	N y A	Cadera -2 motores, plano sagital-. La rodilla está diseñada para permitir la postura estática y evitar el impacto del tobillo (pasivo) en la fase de oscilación.	T4-L5	Rehabilitación Comunidad	Activo-asistido	Muletas o andador específicos	4 h (UC) y 8 h (uso intermitente)	C
<b>ReWalk™</b> (ReWalk Robotics &	A	Cadera y rodilla -4 motores, plano	T4-L5 (Función motora	Rehabilitación (ReWalk™ Rehabilitation)	Pasivo, activo-asistido	Muletas	8 h (UC)	C. Aprobado por FDA de los EEUU.

Argo Medical Technologies)		sagital- Tobillo pasivo.	MMSS preservada)  T7-L5 (Función motora MMSS preservada)	Comunidad (ReWalkTM Personal 6.0)				Certificado de Conformidad Europea.
<b>REX</b> (Rex Bionics)	A	Cadera -4 motores, plano sagital y frontal- y rodilla – 2 motores plano sagital- Tobillo pasivo.	N/E	Rehabilitación (REX Reh)  Comunidad (REX P)	N/E	No	2 h (UC)	C
<b>ROKI</b> (Roki Robotics)	A	Cadera -4 motores, plano sagital y frontal- y rodilla -2 motores plano sagital. Tobillo pasivo	T4-S3	Rehabilitación	N/E	Muletas	4 h (UC)	C
<b>Tréxo Plus</b> (Tréxo Robotics)	N	Cadera y rodilla -4 motores, plano sagital- Tobillo pasivo.	N/E	Rehabilitación Comunidad	Activo- asistido, resistido	Andador anterior o posterior integrado.	N/E	C
<b>Wearable Power Assist Locomotor</b> (Aska Corporation)	A	Cadera, rodilla y tobillo – 6 motores, plano sagital-.	T4-L5 completo (ASIA A/B)	Rehabilitación	Activo- asistido	Dos muletas o andador.	N/E	C

A: adulto; N: niño; h: horas; N/E: no especificado; UC: uso continuo; C: comercialización; P: en pruebas.

#### 4. Discusión

Existen diversos robots de tipo exoesqueleto portables que pueden ser empleados en pacientes con LM, encontrándose la mayoría disponibles para su comercialización en Estados Unidos y/o Europa (Tabla III) y dirigidos a la población adulta. El número de dispositivos creados para la población infantil es escaso (3/20). De estos dispositivos, solo uno de ellos, Tréxo Plus, es exclusivo para la población infantil, mientras que tanto Exo-H2 como Phoenix son empleados tanto en población adulta como infantil. Existen ciertas incongruencias tanto en Exo-H2 como en Phoenix en sus características de talla, puesto que pese se ofrecen como exoesqueletos para población infantil, su talla abarca de 145-195cm y 160-187cm, respectivamente, siendo medidas nada acordes a la población pediátrica. De hecho, rigiéndonos por el Documento de Salud Infantil de la Comunidad de Madrid [39] no encontraríamos ese perfil que exige el exoesqueleto en España, salvo a partir de  $\approx$  11 años en el caso de Exo-H2 y de  $\approx$  17 años en el caso de Phoenix, ambos en su percentil 50%. Cabe destacar que

existe una revisión sistemática previa realizada por Gándara-Sambade et al en 2017 [11] sobre dispositivos robóticos no portables en pacientes con LM con fines clínicos. Sin embargo, en nuestro conocimiento, la presente revisión sistemática es la primera en identificar los dispositivos robóticos portables en la LM en el adulto y en la edad pediátrica proporcionando una clasificación y descripción de las características principales de los distintos sistemas, método de aplicación, las articulaciones diana involucradas, así como sus características técnicas.

La mayor parte de los exoesqueletos se dirigen al control del miembro inferior a nivel de cadera y rodilla en el plano sagital y están diseñados para pacientes adultos con lesiones comprendidas entre T4 y L5, siendo ejemplos de ello Atalante, EksoGT, IndegoTM, Phoenix, RewalkTM, Roki y WPAL. Cabe ser destacado que no todos los dispositivos presentan información sobre sus especificaciones técnicas en la literatura científica, lo cual limita su posible uso terapéutico, así como que la presente revisión sistemática no pretendía estudiar la evidencia científica de la aplicación de dichos exoesqueletos portables de miembro inferior sino la descripción técnica de los mismos.

La mayoría de los exoesqueletos precisan de ayudas adicionales (andadores o muletas) para facilitar la marcha, a excepción de Atalante, BLEEX, Exo-H2 y REX, puesto que el exoesqueleto por sí solo no posee las estrategias de equilibrio óptimas para proporcionar una marcha estable. El coste de los exoesqueletos varía de una casa comercial a otra existiendo un rango desde los 15.000 a los 100.000 dólares.

Diversos trabajos respaldan los beneficios que proporcionan tales exoesqueletos sobre las complicaciones que presentan los pacientes con LM, así podemos destacar: reducción de la espasticidad tras someter a gravedad y fomentar el patrón de marcha; disminución del dolor neuropático tras cada sesión [40]; mejoría en el intestino neurógeno ya que la postura erguida y la facilitación de la marcha promueven la motilidad intestinal lo cual reduce el uso de enemas y el tiempo de defecación [41]; disminuye la pérdida progresiva de densidad mineral ósea frecuentemente relacionada con la osteoporosis, especialmente presente en la parte distal del fémur y proximal de la tibia [42]; aumenta la frecuencia cardíaca y el consumo de oxígeno de forma que fomentan de forma eficaz el ejercicio cardiovascular y el gasto energético disminuyendo así los riesgos cardiovasculares y la obesidad [43].

La terapia robótica ha mostrado ser una técnica segura y cómoda, permitiendo aumentar la intensidad y el número de repeticiones del tratamiento de rehabilitación mediante una terapéutica orientada y guiada por el fisioterapeuta con independencia de que el dispositivo sea o no portable. Estos dispositivos permiten la monitorización de los progresos de tratamiento además de proporcionar una retroalimentación visual y sensorial óptimos [44,45]. En la etapa inicial de rehabilitación de los pacientes con LM, los exoesqueletos se presentan como una estrategia de control de seguimiento de la trayectoria viable cuando los usuarios no tienen suficiente fuerza en sus extremidades inferiores. Sin embargo, después de un período de entrenamiento es primordial que se adopten estrategias de control del grado de asistencia necesaria para proporcionar un entrenamiento más efectivo con la participación activa de los pacientes [13]. Un factor limitante descrito de los dispositivos robotizados de tipo exoesqueleto, ya sean portables o no portables, es que reducen la variabilidad del movimiento, lo cual puede promover a que el paciente disminuya su actividad muscular al confiar en el dispositivo, realizando por tanto un menor trabajo del deseado [5,11]. Este hecho, hace fundamental la necesidad de que sean un complemento terapéutico y no una terapia en sí misma [4].

Los programas de entrenamiento intensivo con exoesqueleto portables, según algunos estudios [24,45] son seguros, independientemente del dispositivo, pero también arrojan una serie de riesgos y/o complicaciones que cabe tener en cuenta tanto para su uso en rehabilitación como en comunidad. Estos son: quemaduras cutáneas y/o hematomas producto del roce y/o presión del dispositivo, dolor muscular o articular, fracturas (la más frecuente se da en el astrágalo [12] aunque se ha documentado algún caso del calcáneo), colapso venoso-linfático y caídas [46,47]. Por lo tanto, la evaluación de la aparición de riesgos y/o complicaciones durante un programa de entrenamiento de exoesqueleto es importante para las recomendaciones clínicas.



Conviene resaltar que, pese a no ser el objeto de la presente revisión, algunos de los trabajos previos publicados acerca de dispositivos no portables en pacientes con LM incompleta muestran eficacia en el entrenamiento de la marcha, aunque no aseguran resultados superiores al tratamiento convencional [48,49]. Asimismo, una revisión de 2010 [50] estableció que no existían pruebas de que el entrenamiento asistido por robot, fuese o no portable, mejorase la función de marcha en personas con LM más que otras estrategias de entrenamiento locomotor. Contrariamente, otra revisión sistemática con metaanálisis de 2016 [8] investigó la efectividad y la seguridad de los exoesqueletos portables concluyendo que el 67% de los pacientes sujetos a estudio (LM completa) tras un programa de entrenamiento de exoesqueleto lograban deambular con exoesqueleto sin asistencia física adicional, aunque debido al cuadro lesional, la rehabilitación no facilitaría una marcha independiente. Cabe destacar que los estudios incluidos en la revisión no compararon la rehabilitación del exoesqueleto con otras modalidades fisioterapéuticas.

Finalmente, con relación a la usabilidad y la satisfacción relacionada con el uso de estos dispositivos, según Mardomingo et al [7], la satisfacción de los pacientes después de las sesiones de tratamiento con exoesqueletos portables parece ser elevada, encontrándose las puntuaciones más altas en los parámetros de seguridad y facilidad de uso, y las más bajas en las referidas a la comodidad del dispositivo.

La presente revisión adolece de una serie de limitaciones. Los artículos seleccionados estaban escritos en español y/o inglés publicados después del 2009, quedando excluidos aquellos disponibles en otras lenguas y anteriores a dicho año. Las bases de datos consultadas fueron limitadas, pudiendo quedar fuera de la presente revisión artículos en otras bases de datos. Se excluyeron todos aquellos artículos que incluían pacientes con diagnósticos mixtos, así como exoesqueletos híbridos (en combinación con FES), por lo que futuros estudios deberían valorar la aplicabilidad de dichos sistemas en la LM.

## 5. Conclusiones

En la presente revisión se han encontrado un total de 20 exoesqueletos portables susceptibles de ser empleados en personas con LM, siendo sólo 3 de ellos destinados a la población infantil. La mayor parte de los exoesqueletos precisan de un producto de apoyo complementario para proporcionar el equilibrio necesario durante la marcha y éstos se emplean con fines rehabilitadores. El nivel lesional idóneo para su uso no se especifica en algunos de los dispositivos. La mayoría de los sistemas robóticos portables en la LM presentan como articulaciones diana la cadera y la rodilla, permitiendo el movimiento en el plano sagital.

**Agradecimientos:** los autores declaran que no se ha recibido ni ayudas ni financiación.

**Conflictos de Intereses:** los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

## Abreviaturas

Las siguientes abreviaturas son usadas en este manuscrito:

ASIA: American Spinal Injury Association

FES: estimulación eléctrica funcional

LM: lesión medular

MMSS: miembros superiores

MMII: miembros inferiores

## Referencias Bibliográficas

1. ASPAYM-Madrid. Lesión Medular: Guía para el manejo integral del paciente con lesión medular crónica [internet]. Madrid: ASPAYM; 2013 [cited 2019 Feb 15]. Available from: <https://www.aspaymmadrid.org/wp-content/uploads/2018/05/guia-manejo-integral-2013.pdf>.
2. Esclarín de Ruz A. Lesión medular: enfoque multidisciplinario. 1ª ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2009.
3. Harvey L. Tratamiento de la lesión medular. Guía para fisioterapeutas. 1ª ed. Barcelona: Elsevier España; 2010.
4. Fleerkotte B, Koopman B, Buurke J, Van Asseldonk E, Van der Kooij H, Rietman J. The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: and explorative studio. *J Neuroeng Rehabil* 2014; 11:1-15.
5. Edgerton V, Roy R. Robotic training and spinal cord plasticity. *Brain Res Bull* 2009; 78(1):4-12.
6. Tefertiller C, Hays K, Jones J, Jayaraman A, Hartigan C, Bushnik T, et al. Initial outcomes from a multicenter study utilizing the Indego powered exoskeleton in spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2018; 24(1):78-85.
7. Mardomingo-Medialdea H, Fernández-González P, Molina-Rueda F. Usabilidad y aceptabilidad de los exoesqueletos portables para el entrenamiento de la marcha en sujetos con lesión medular: Revisión sistemática. *Rev Neurol* 2018; 66(2):35-44.
8. Miller L, Zimmermann A, Herbert W. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Med Devices* 2016; 9:455-466.
9. Juszczak M, Gallo E, Bushnik T. Examining the effects of a powered exoskeleton on quality of life and secondary impairments in people living with spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2018; 24(4):336-342.
10. 10. who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury [Internet]. Ginebra: World Health Organization; c2019 [cited 2019 Jan 22]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>.
11. 11. Gándara-Sambade T, Fernández-Pereira M, Rodríguez-Sotillo A. Sistemas robotizados para la reeducación de la marcha en la lesión medular: una revisión sistemática. *Rev Neurol* 2017; 64(5):205-213.
12. 12. Louie D, Eng J, Lam T. Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study. *J Neuroeng Rehabil* 2015; 14:12-82.
13. 13. 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* 2016; 5:26-37.
14. 14. Calderón Bernal A, Cano de la Cuerda, R, Alguacil Diego I, Molina Rueda F, Cuesta Gómez A, Miangolarra Page J. Terapia robótica para la rehabilitación de la marcha en patología neurológica. *Rehabilitación* 2015; 49(3):177-192.
15. 15. Gagnon D, Escalona M, Vermette M, Carvalho L, Karelis A, Duclos C, et al. Locomotor training using an overground robotic exoskeleton in long-term manual wheelchair users with a chronic spinal cord injury living in the community: Lessons learned from a feasibility study in terms of recruitment, attendance, learnability, performance and safety. *J Neuroeng Rehabil* 2018; 15:12.
16. 16. Palermo A, Maher J, Baunsgaard C, Nash M. Clinician-focused overview of bionic exoskeleton use after spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2017; 23(3): 234-244.
17. 17. Urrutia G, Bonfill X. Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Elsevier* 2010; 135(11): 485-532.
18. blog.bioniklabs.com/news-media/press-releases/detail/50/bionik-laboratories-corp-completes-integration-of-amazon [Internet]. Toronto: ArkeTM; c2018 [cited 2019 Mar 04]. Available from: <https://blog.bioniklabs.com/news-media/press-releases/detail/50/bionik-laboratories-corp-completes-integration-of-amazon>.
19. wandercraft.eu/en/exo/ [Internet]. París: Atalante; c2019 [cited 2019 Apr 05]. Available from: <https://wandercraft.eu/en/exo/>.
20. axosuits.com/ [Internet]. Oradea: Axosuits; c2018 [cited 2019 Mar 22]. Available from: <http://axosuits.com/>.

21. [bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/bleex/](https://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/bleex/) [Internet]. Berkeley: Berkeley Lower Extremity Exoskeleton; c2018 [cited 2019 Feb 15]. Available from: <https://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/bleex/>.
22. [ri.cuhk.edu.hk](http://ri.cuhk.edu.hk) [Internet]. Hong Kong: CUHK-EXO; c2019 [cited 2019 Apr 04]. Available from: <http://ri.cuhk.edu.hk>.
23. [eksobionics.com/?lang=es](https://eksobionics.com/?lang=es) [Internet]. Richmond: Ekso GTTM; c2019 [cited 2019 Feb 20]. Available from: <https://eksobionics.com/?lang=es>.
24. Wu C, Mao H, Hu J, Wang T, Tsai Y, Hsu W. The effects of gait training using powered lower limb exoskeleton robot on individuals with spinal cord injury. *J Neuroeng Rehabil* 2018; 15:14.
25. [bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2/](https://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2/) [Internet]. Berkeley: eLEGS; c2018 [cited 2019 Jan 09]. Available from: <https://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/elegs%E2%84%A2/>.
26. [exoatlet.com/en/for-clinics](https://www.exoatlet.com/en/for-clinics) [Internet]. Moscú: ExoAtlet; c2018 [cited 2019 Apr 05]. Available from: <https://www.exoatlet.com/en/for-clinics>.
27. Gil-Agudo A, Pons JL, Alcobendas-Maestro M, Lozano-Berrio V, Benito-Penalva J, García S, del-Ama AJ, editor. The EXO-H2 Robotic Exoskeleton For Gait Rehabilitation After Spinal Cord Injury: Preliminary Clinical Findings. IX Congreso Iberoamericano de Tecnología de Apoyo a la Discapacidad; October; Dublín, Irlanda: ISCOS; 2017.
28. [gogoa.eu](http://gogoa.eu) [Internet]. Guipuzcoa: HANK; c2016 [cited 2019 Apr 05]. Available from: Available at: <http://gogoa.eu>.
29. Wansoo K, Heedon L, Donghwan K, Jungsoo H, Changsoo H, editor. Mechanical design of the Hanyang Exoskeleton Assistive Robot (HEXAR). 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS); 22-25 October; Gyeonggi-do, Korea: IEEE; 2014.
30. [hyundai.news/eu/brand/hyundai-motor-leads-personal-mobility-revolution-with-advanced-robots/](http://hyundai.news/eu/brand/hyundai-motor-leads-personal-mobility-revolution-with-advanced-robots/) [Internet]. Seúl: Hyundai; c2017 [cited 2019 Apr 05]. Available from: <http://hyundai.news/eu/brand/hyundai-motor-leads-personal-mobility-revolution-with-advanced-robots/>.
31. [indegocom/indego/en/home](http://indegocom/indego/en/home) [Internet]. Philadelphia: Indego; c2019 [cited 2019 Feb 15]. Available from: Available from: <http://indegocom/indego/en/home>.
32. Raj A, Neuhaus P, Moucheboeuf A, Noorden J, Lecoutre D. Mina: A sensorimotor robotic orthosis for mobility assistance. *Journal of Robotics* 2011.
33. [suitx.com/phoenix-medical-exoskeleton](https://suitx.com/phoenix-medical-exoskeleton) [Internet]. Berkeley: Phoenix; c2017 [cited 2019 Apr 05] Available from: <https://suitx.com/phoenix-medical-exoskeleton>.
34. [rewalk.com/](https://rewalk.com/) [Internet]. Yokneam: ReWalkTM; c2019 [cited 2019 Apr 05] Available from: <https://rewalk.com/>.
35. [rexbionics.com](https://www.rexbionics.com/) [Internet]. Auckland: REX; c2019 [cited 2019 Mar 23]. Available from: <https://www.rexbionics.com/>.
36. [rokirobotics.com/visitanos](https://www.rokirobotics.com/visitanos) [Internet]. Zapopan: Roki; c2019 [cited 2019 Apr 05]. Available from: <https://www.rokirobotics.com/visitanos>.
37. [trexorobotics.com/](https://trexorobotics.com/) [Internet]. Mississauga: Tréxo Plus; c2018 [cited 2019 Mar 25]. Available from: <https://trexorobotics.com/>.
38. Kagawa T, Uno Y. Gait pattern generation for a power-assist device of paraplegic gait. *IEEE Xplore* 2009: 633-638.
39. Documento de Salud Infantil [internet]. España: Consejería de sanidad; 2019 [cited 2019 May 20]. Available from: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM020257.pdf>.
40. Stampacchia G, Rustici A, Bigazzi S, Gerini A, Tombini T, Mazzoleni S. Walking with a powered robotic exoskeleton: subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons. *NeuroRehabilitation* 2016; 39(2):277-283.
41. Huang Q, Yu L, Gu R, Zhou Y, Hu C. Effects of robot training on bowel function in patients with spinal cord injury. *J Phys Ther Sci* 2015; 27(5):1377-1378.
42. Karelis AD, Carvalho LP, Castillo MJ, Gagnon DH, Aubertin-Leheudre M. Effect on body composition and bone mineral density of walking with a robotic exoskeleton in adults with chronic spinal cord injury. *J Rehabil Med* 2017; 49(1):84-87.

43. Evans N, Hartigan C, Kandilakis C, Pharo E, Clesson I. Acute cardiorespiratory and metabolic responses during exoskeleton-assisted walking overground among persons with chronic spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2015; 21(2):122-132.
44. Calderón Bernal AM, Alguacil Diego IM, Molina Rueda F, Cuesta Gómez A, Miangolarra Page JC, Cano de la Cuerda R. Dispositivos robóticos. Aplicaciones en el miembro inferior. In: Cano de la Cuerda R, editor. *Nuevas tecnologías en Neurorrehabilitación. Aplicaciones diagnósticas y terapéuticas*. 1st ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2018. p. 71-79.
45. Yan T, Cempini M, Oddo C, Vitiello N. Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. *Rob Auton Syst* 2015; 64:120-136.
46. Van Dijsseldonk R, Rijken H, Van Nes I, Van de Meent H, Keijsers N. A framework for measuring the progress in exoskeleton skills in people with complete spinal cord injury. *Front Neurosci* 2017; 12(11):699.
47. Onose G, Cardei V, Craciunoiu S, Avramescu V, Opris I, Lebedev MA, et al. Mechatronic wearable exoskeletons for bionic bipedal standing and walking: a new synthetic approach. *Front Neurosci* 2016; 10:343.
48. Ortiz Zalama A, Cano de la Cuerda R, Ortiz Zalama LI, Gil Agudo AM. Nuevas tecnologías en la reeducación de la marcha en pacientes con lesión medular incompleta. Una revisión sistemática. *Rehabilitación* 2015; 49(2):90-101.
49. Puyuelo-Quintana G, Gil-Agudo AM, Cano-de la Cuerda R. Eficacia del sistema robótico de entrenamiento de la marcha tipo Lokomat en la rehabilitación de pacientes con lesión medular incompleta. Una revisión sistemática. *Rehabilitación* 2017; 51(3):182-190.
50. Swinnen E, Duerinck S, Baeyens JP, Meeusen R, Kerckhofs E. Effectiveness of robot-assisted gait training in persons with spinal cord injury: a systematic review. *J Rehabil Med* 2010; 42(6):520-526.



© 2020 por los autores; Esta obra está sujeta a la licencia de Reconocimiento 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.