

Avances en neurorehabilitación y perspectivas sobre el control y aprendizaje motor: revisión de alcance

Advances in neurorehabilitation and perspectives on motor control and motor learning: a scoping review

Avanços na neuroreabilitação e perspectivas sobre o controle e a aprendizagem motora: revisão de escopo

Karen Ginneth López Hernández¹, Zulay Karina Ibarra Velandria¹

¹ Escuela Colombiana de Rehabilitación. Bogotá, Colombia.

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión de alcance que analiza la relevancia del aprendizaje motor como eje fundamental en la reorganización funcional del sistema nervioso, destacando los enfoques explícitos e implícitos como estrategias terapéuticas diferenciadas. El objetivo consistió en explorar los avances recientes en neurorehabilitación y analizar las perspectivas actuales sobre el control y el aprendizaje motor. Se realizó una búsqueda inicial de 164 estudios en las bases de datos PubMed, Scopus, Wiley y PEDro, de los cuales se seleccionaron 42 documentos que cumplieron con los criterios de elegibilidad y las directrices del Instituto Joanna Briggs (JBI), incluyendo ensayos clínicos aleatorizados, revisiones sistemáticas y literatura gris publicados entre 2015 y 2025. La evidencia sugiere que las intervenciones innovadoras, que integran tecnologías emergentes como la realidad virtual, las interfaces cerebro-computadora, la estimulación eléctrica cerebral no invasiva y la gamificación, inducen cambios plásticos en la función cerebral. Se determinó que la validez de los protocolos de neurorehabilitación depende de prescripciones específicas en cuanto a intensidad, duración y frecuencia. Se destaca la necesidad de estandarizar protocolos, ampliar la muestra en estudios experimentales y validar las intervenciones en entornos clínicos reales, identificando vacíos que orientan las futuras investigaciones hacia modelos integra-dores, accesibles y sostenibles en el campo de la neurorehabilitación.

Palabras clave: neurorehabilitación; aprendizaje motor; control motor; trastornos neurológicos.

Recibido: 15-10-2025

Aceptado: 04-12-2025

OPEN ACCESS



© 2025 Los autores. Publicado por la
Revista Herediana de Rehabilitación.

CITAR COMO:

López KG, Ibarra ZK. Avances en neurorehabilitación y perspectivas sobre el control y aprendizaje motor: revisión de alcance. Revista Herediana de Rehabilitación. 2025;8(2):e7271. DOI: [10.20453/rhr.v8i2.7271](https://doi.org/10.20453/rhr.v8i2.7271)

ABSTRACT

This article presents a scoping review that analyzes the relevance of motor learning as a fundamental axis in the functional reorganization of the nervous system, highlighting explicit and implicit approaches as differentiated therapeutic strategies. The objective was to explore recent advances in neurorehabilitation and to analyze current perspectives on motor control and motor learning. An initial search identified 164 studies across PubMed, Scopus, Wiley, and PEDro databases, of which 42 documents met the eligibility criteria and the Joanna Briggs Institute (JBI) guidelines, including randomized controlled trials, systematic reviews, and gray literature published between 2015 and 2025. Evidence suggests that innovative interventions integrating emerging technologies --such as virtual reality, brain-computer interfaces, noninvasive electrical brain stimulation, and gamification --induce neuroplastic changes in brain function. It was determined that the validity of neurorehabilitation protocols depends on specific prescriptions regarding intensity, duration, and frequency. The report highlights the need to standardize protocols, expand sample sizes in experimental studies, and validate interventions in real-world clinical settings, identifying research gaps that guide future investigations toward integrative, accessible, and sustainable models in the field of neurorehabilitation.

Keywords: neurorehabilitation; motor learning; motor control; neurological disorders.

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão de escopo que analisa a relevância da aprendizagem motora como eixo fundamental na reorganização funcional do sistema nervoso, destacando os enfoques explícitos e implícitos como estratégias terapêuticas diferenciadas. O objetivo consistiu em explorar os avanços recentes em neuroreabilitação e analisar as perspectivas atuais sobre o controle e a aprendizagem motora. Foi realizada uma busca inicial de 164 estudos nas bases de dados PubMed, Scopus, Wiley e PEDro, dos quais foram selecionados 42 documentos que atenderam aos critérios de elegibilidade e às diretrizes do Instituto Joanna Briggs (JBI), incluindo ensaios clínicos aleatórios, revisões sistemáticas e literatura cinzenta publicados entre 2015 e 2025. A evidência sugere que intervenções inovadoras, que integram tecnologias emergentes como realidade virtual, interfaces cérebro-computador, estimulação elétrica cerebral não invasiva e gamificação, induzem mudanças plásticas na função cerebral. Determinou-se que a validade dos protocolos de neuroreabilitação depende de prescrições específicas quanto à intensidade, duração e frequência. Destaca-se a necessidade de padronizar protocolos, ampliar o tamanho da amostra em estudos experimentais e validar as intervenções em ambientes clínicos reais, identificando lacunas que orientam futuras pesquisas para modelos integradores, acessíveis e sustentáveis no campo da neuroreabilitação.

Palavras-chave: neuroreabilitação; aprendizagem motora; controle motor; transtornos neurológicos.

INTRODUCCIÓN

La complejidad estructural y funcional del sistema nervioso (SN) representa un foco de interés constante para la neurociencia, al tratarse de uno de los principales sistemas del desarrollo humano. Entre las disciplinas encargadas de su estudio destaca la neurorehabilitación, considerada emergente para algunos y desconocida para otros (1). Esta área de las ciencias de la salud posee un conocimiento profundo de la función cerebral, las relaciones sinápticas neuronales y los principios neurofisiológicos como la plasticidad cerebral (2).

La plasticidad cerebral es una capacidad inherente a la dinámica del SN, que permite la maduración y el desarrollo adaptativo del ser humano desde los períodos prenatales y posnatales, hasta la adolescencia y la edad adulta (3). Maier et al. (4) explican que el entrenamiento es crucial para la recuperación; según su propuesta, la exposición a experiencias específicas, caracterizadas por la repetición, la intensidad, el tiempo y los objetivos, conduce a una reorganización de los circuitos cerebrales. Esto restaura la función perdida o comprometida mediante la activación de centros reguladores del control motor, lo cual favorece el aprendizaje.

Comprender este principio implica modificar las acciones de rehabilitación neurológica y la planificación de las sesiones, considerando los mecanismos de aprendizaje de cada individuo y factores como la edad, la motivación, la experiencia o antecedentes personales (2). Los enfoques de tratamiento en fisioterapia neurológica han evolucionado en los últimos 60 años, transitando desde fundamentos neurofisiológicos hacia perspectivas más pragmáticas y eclécticas basadas en el aprendizaje motor, la ciencia del ejercicio y la biomecánica (5). Estos enfoques optimizan la adherencia y la personalización terapéutica, planteando retos para la formación especializada en instituciones educativas y gremiales, al tiempo que incrementan el interés emocional y racional de los profesionales del área (6).

Asimismo, la innovación tecnológica ha sido fundamental para ofrecer evaluaciones precisas y objetivas del rendimiento motor, al cuantificar parámetros como fuerza, coordinación y velocidad mediante el uso de plataformas de realidad virtual (RV) y dispositivos robóticos (7). Los sistemas de RV facilitan la manipulación de situaciones ambientales y tareas para fomentar la resolución de problemas y mejorar la generalización de los movimientos aprendidos fuera del entorno clínico (8).

En ese sentido, el objetivo de esta revisión de alcance es explorar los avances recientes en neurorrehabilitación y analizar las perspectivas actuales sobre el control y el aprendizaje motor, a fin de identificar enfoques terapéuticos emergentes que sustenten la práctica clínica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión exploratoria de alcance para sintetizar la amplitud de la literatura disponible (9), siguiendo las directrices actualizadas descritas en el manual del revisor del Instituto Joanna Briggs (JBI) (10).

La pregunta de investigación se formuló mediante el modelo PCC (población, concepto y contexto):

- Población: personas con enfermedad neurológica.
- Concepto: avances en neurorrehabilitación, control y aprendizaje motor.
- Contexto: estudios clínicos, experimentales, revisión y desarrollos teóricos.

Estrategias de búsqueda y criterios de selección

La búsqueda se llevó a cabo entre junio y octubre de 2025 en las bases de datos y bibliotecas virtuales PubMed, Scopus, Wiley Online Library y PEDro, utilizando términos MeSH y operadores booleanos («AND», «OR» y «NOT»). La ecuación de búsqueda empleada fue la siguiente:

(«nervous system disease» OR «functional neurological disorders») AND («neurorehabilitation» OR «neurology rehabilitation») AND («motor control» OR «motor performance») AND («motor learning» OR «motor skills»).

Para la selección de documentos, los criterios de inclusión fueron: i) año de publicación entre 2015 y 2025, rango establecido debido a la extensión y propósito de la investigación; ii) idiomas inglés y español; iii) estudios de evaluación o intervención del control y aprendizaje motor; iv) población pediátrica o adulta con alteración o enfermedad neurológica; v) implementación de estrategias de innovación o emergentes en rehabilitación; vi) ensayos clínicos aleatorizados, estudios experimentales u observacionales, revisiones sistemáticas, revisiones narrativas y literatura gris.

Por otro lado, los criterios de exclusión fueron: i) documentos que especificaran tratamiento farmacológico o quirúrgico; ii) pacientes con alteraciones de conciencia o trastornos neuropsicológicos; y iii) cartas al editor, tesis de grado o documentos que no reportaran resultados.

No se realizó la evaluación de la calidad metodológica debido a la heterogeneidad de los artículos incluidos, ya que no constituye un requisito obligatorio en una revisión de alcance (11).

RESULTADOS

La búsqueda arrojó un total de 164 documentos provenientes de dos de las cuatro bases de datos consultadas: 90 de Scopus y 74 de Wiley Online Library. Antes de evaluar la elegibilidad, se utilizó Rayyan (12), una herramienta de inteligencia artificial diseñada para el análisis de revisiones sistemáticas y bibliográficas, con el propósito de corroborar el análisis realizado por los revisores; en este proceso no se identificaron referencias duplicadas.

En las otras dos bases de datos no se hallaron estudios que cumplieran con la combinación de descriptores y operadores booleanos definidos para esta *scoping review* (tabla 1). Esta ausencia de resultados puede explicarse por diversos factores metodológicos y estructurales: i) cada base de datos posee un enfoque particular respecto a las disciplinas que indexa, siendo posible que las fuentes sin resultados estén menos centradas en el área de la neurorrehabilitación; ii) los descriptores clave empleados podrían no estar actualizados en dichas bases o no vincularse con nuevas líneas de investigación, lo que reduce la sensibilidad de la búsqueda; iii) dificultades en la recuperación de artículos por una estructura de metadatos limitada, pese a la pertinencia temática de los términos utilizados; y iv) las restricciones rigurosas de año e idioma aplicadas pudieron excluir publicaciones de forma automática.

Tabla 1. Términos de búsqueda y resultados por cada base de datos.

Términos de búsqueda	PubMed	Scopus	Wiley	PEDro
S1: «nervous system disease»	13 902	289 449	22 123	54
S2: «functional neurological disorders»	445	136 774	218	12
S3: S1 OR S2	15 447	312 804	22 322	5
S4: «neurorrehabilitation»	17 219	3886	3060	68
S5: «neurology rehabilitation»	229	47 539	226	15
S6: S4 OR S5	17 441	49 236	3250	0
S7: «motor control»	21 788	32 303	12 910	1450
S8: «motor performance»	11 593	11 582	8142	460
S9: S7 OR S8	32 546	33 299	19 252	346
S10: «motor learning»	8490	6898	3553	106
S11: «motor skills»	37 198	17 269	11 511	194
S12: S10 OR S11	43 382	21 870	14 004	20
S13: S3 AND S6 AND S9 AND S12	0	90	74	0

Dado que, a la fecha, no se había propuesto esta combinación exacta de búsqueda en ninguna otra revisión de alcance, los resultados reflejan una limitación real en la literatura disponible en dichas bases de datos.

Extracción de los datos y síntesis de la evidencia

Los revisores analizaron la evidencia por medio de la lectura de títulos y resúmenes; se excluyeron 91 es-

tudios y se seleccionaron 73 documentos conforme a los criterios predeterminados. Posteriormente, se realizó la lectura a texto completo, en la que se descartaron 7 artículos mediante verificación humana, lo que resultó en un total de 66. Durante la validación de elegibilidad, se eliminaron 24 artículos adicionales por diversos motivos, seleccionando finalmente 42 estudios por consenso entre los dos revisores para minimizar errores (figura 1).

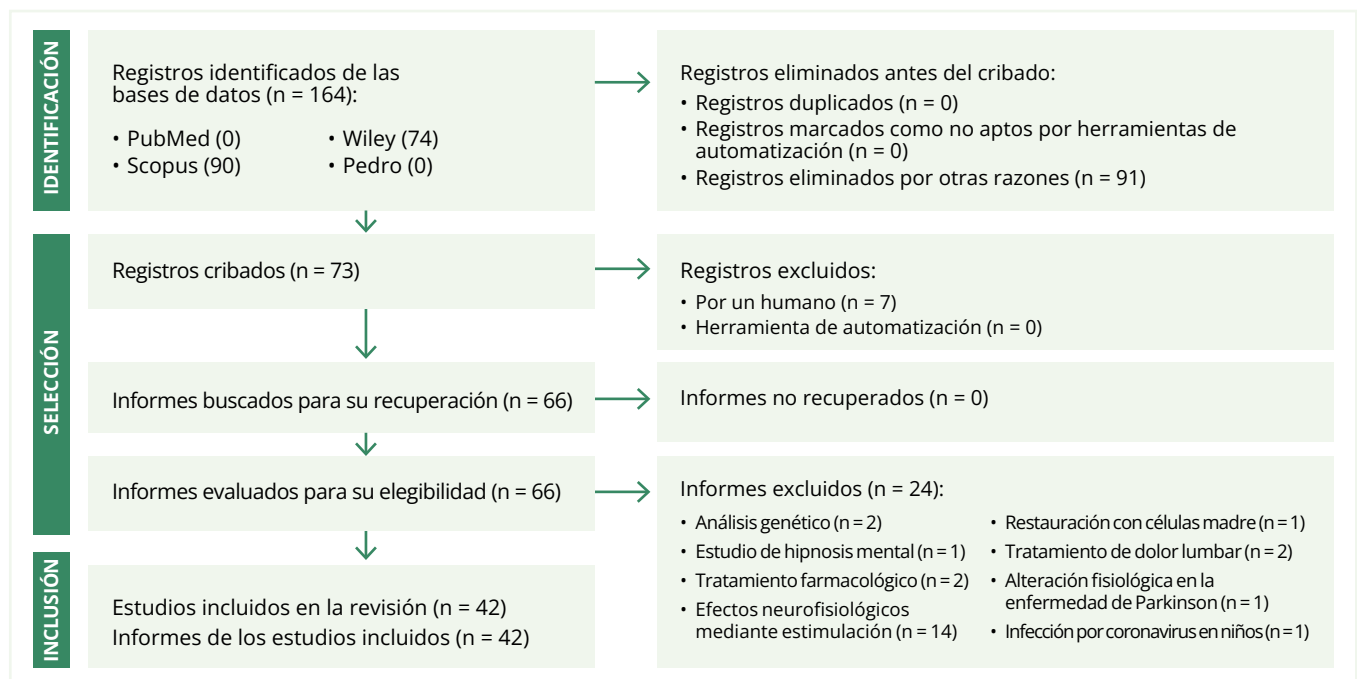


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 para nuevas revisiones sistemáticas que incluyen búsquedas únicamente en bases de datos y registros (13).

La información extraída se organizó en una matriz definida por tipo de estudio, país, año, población, intervención o tratamiento, resultados principales, enfoque o perspectiva y con-

clusiones (tabla 2). Dos revisores completaron la extracción de los datos y el equipo inició el cribado con un nivel de acuerdo superior al 75 %, aplicando las herramientas del JBI (10).

Tabla 2. Recolección y análisis de estudios en neurorrehabilitación en los últimos 10 años.

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
1	Harada et al. (14)	2020	ECA	Japón	Adultos sanos	Estimulación cerebral transcraneal no invasiva (tACS, tDCS): corriente alterna o directa, combinada con tareas motoras o de aprendizaje visomotor.	Mejora del desempeño y activación cortical facilitando el aprendizaje.	Neurofisiológico-neuroplasticidad
2	Yang et al. (15)	2021	Revisión narrativa	China	Pacientes posictus	BCI aplicada a rehabilitación (FES, RV, exoesqueletos, comunicación).	Favorece la reorganización cortical y la recuperación motora.	Neurociencia aplicada a la rehabilitación
3	Marino y Mantini (16)	2024	Revisión narrativa	Bélgica	Adultos sanos y disfunciones neurológicas	Uso de electroencefalografía de alta densidad (hdEEG): análisis y procesamiento de mapeo cerebral.	Permite mayor precisión en la evaluación de la activación cortical.	Neuroimagen-neurofisiología
4	He et al. (17)	2019	ECA	China	Pacientes posictus	Imaginación motora + BCI + retroalimentación EEG + fisioterapia convencional, durante 4 semanas, 5 sesiones por semana.	Induce la plasticidad cortical medida para facilitar el control motor voluntario y la recuperación funcional.	Neuroplasticidad
5	Gandolfi et al. (18)	2024	ECA	Italia	Pacientes con EP	Entrenamiento en realidad virtual inmersiva multitarea + <i>balance training</i> + <i>feedback</i> multisensorial + fisioterapia convencional.	Mejora en control postural, desempeño cognitivo en tareas duales y aprendizaje motor.	Neuroplasticidad
6	Liao et al. (19)	2025	ECA	Australia	Adultos sanos	Entrenamiento combinado cerebral-transcraneal + estimulación transcraneal (tDCS): ejercicio de equilibrio con estimulación eléctrica anódica, durante 4 semanas, 3 sesiones por semana durante 20 minutos por sesión.	Sinergia entre la estimulación cortical y el aprendizaje motor.	Neuroplasticidad
7	Pimentel-Ponce et al. (20)	2024	Revisión sistemática	España	Niños y adolescentes con trastornos neuromotores	Uso de sistemas de gamificación: videojuegos, plataformas interactivas como Nintendo Wii y Wii Fit Plus, durante 1 a 6 sesiones por semana.	Estimula la motivación y la adherencia al tratamiento.	Neuroplasticidad, modelo Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasiva; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

Tabla 2. (Continuación).

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
8	Oliveira et al. (21)	2025	Estudio cualitativo de diseño participativo multiperspectivo	Portugal	Pacientes posictus	Diseño colaborativo para implementar tecnologías BCI + RV inmersiva + práctica mental sin ejecución física.	Optimiza los protocolos de trabajo, mejora la motivación del paciente y facilita la AVD.	Neuroplasticidad
9	Sihvonen et al. (22)	2017	Revisión narrativa	Finlandia	Pacientes posictus, Alzheimer, EP, EM, epilepsia	Intervenciones activas (instrumentos, canto) y receptivas (escucha musical). Incluye terapia musical de soporte (MST), estimulación rítmica auditiva (RAS) y terapia melódica (MIT).	Facilita la sincronización motora, el lenguaje y la emoción. Reduce los síntomas psiquiátricos.	Neuroplasticidad
10	Schachten y Jansen (23)	2015	ECA	Alemania	Pacientes posictus	Tareas motoras como la práctica de golf coordinativo adaptado + juego cognitivo.	Integración cognitivo-motora y de la atención, mejora de la función visoespacial.	Neuroplasticidad
11	Talimkhani et al. (24)	2025	ECA	Irán	Pacientes posictus	Estimulación transcraneal por corriente directa dual (dual-tDCS) aplicada durante las tareas de aprendizaje motor implícito (Serial Reaction Time Task-SRTT), durante 3 días consecutivos de 20 minutos por sesión.	Mejora el aprendizaje motor implícito y la plasticidad interhemisférica.	Neuroplasticidad-neurofisiológico
12	Grünbaum y Christensen (25)	2024	Revisión narrativa	Dinamarca	Adultos sanos y disfunciones neurológicas	Vibración muscular + bloqueo nervioso periférico + estimulación cortical (TMS).	Induce sensaciones de movimiento y evalúa la percepción motora.	Teoría del comando motor y teoría de inferencia activa
13	Hardeman et al. (26)	2025	Cualitativo exploratorio	Países Bajos	Pacientes con EP	Juegos terapéuticos domiciliarios con realidad aumentada + gamificación + entrenamiento de marcha y equilibrio + <i>feedback</i> visual/háptica, durante 6 semanas, 5 días por semana, 30 minutos por sesión.	Mejora el control postural, la fuerza y la adherencia al tratamiento.	Neuroplasticidad
14	Dutta y Das (27)	2025	Protocolo de investigación	Reino Unido	Pacientes posictus y EP	Tecnología con realidad extendida: Entrenamiento de relajación y fuerza en RV, juegos terapéuticos con retroalimentación visual y háptica + Biofeedback basado en señales cerebrales (EEG, fNIRS)	Integra el control cerebral y genera retroalimentación multimodal.	Neurocomputación-neurotecnología

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasivas; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

Tabla 2. (Continuación).

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
15	Lv y Guo (28)	2022	Revisión narrativa	China	Pacientes posictus, EP, EM, esquizofrenia, ansiedad, depresión, fobias) y niños con parálisis cerebral	RV inmersiva y semiinmersiva + dispositivos como guantes inteligentes (Rapael Smart Glove) + juegos serios y entornos virtuales interactivos + sistemas de sensores para seguimiento de movimiento.	Reentrenamiento motor y funcional multisensorial, aumenta la motivación.	Neuroplasticidad funcional
16	Antonioni et al. (29)	2024	Revisión narrativa	Italia	Adultos sanos y disfunciones neurológicas	AO e imagería motora (MI) como herramientas para activar el MNS + NIBS del cerebelo (TMS, tDCS, tACS, TBS).	Mejora el aprendizaje motor y la coordinación a través de la modulación cortical.	Neuroplasticidad-neurofisiológico
17	Corrini et al. (30)	2023	Revisión sistemática y metaanálisis	Italia	Pacientes con EM	Ocho categorías de intervención: ejercicios orientados a tareas, videojuegos (<i>exergames</i>), yoga, pilates, terapia vibratoria, ejercicio aeróbico, ejercicios de resistencia, ejercicios acuáticos e hipoterapia, durante sesiones de 30 a 60 minutos, de 2 a 3 veces por semana.	Mejora la función motora, el equilibrio y la resistencia.	Neuroplasticidad
18	Huang et al. (31)	2023	<i>Yearbook</i>	China	Pacientes adultos posictus, LM, TCE, con deterioro cognitivo leve. Niños con parálisis cerebral, TEA, ataxia, hemiplejía	Estrategias neurorrestitutivas multimodales: terapias celulares, neuromodulación, cirugía, BCI, farmacoterapia y RV.	Restaura o sustituye las funciones neurológicas.	Neuroplasticidad-neurorrestitución
19	Zaragoza-Mezquita et al. (32)	2025	Casos y controles	España	Pacientes con EM	Programa RV: plataforma inmersiva «Ikinsu». Tareas: identificación de los estímulos geométricos (<i>targets vs. distractores</i>) con variaciones en velocidad (4, 5, 6 m/s) y las condiciones de cambio de tarea, durante 10 sesiones de 15 minutos.	Mejora la atención, la memoria y el procesamiento cognitivo.	Neuroplasticidad
20	Hussain et al. (33)	2023	Casos y controles	Canadá	Adultos sanos	Contracción ipsilateral: contracción isométrica del músculo interóseo dorsal ipsilateral al sitio de estimulación + mapeo motor	Mide la excitabilidad cortical y la respuesta motora.	Neurofisiológico

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasivas; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

Tabla 2. (Continuación).

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
21	Benadduci et al. (34)	2025	Protocolo usabilidad	Italia	Pacientes adultos con disfunciones neurológicas	Sistema RecoveryFun: Incluye visor de RV (PICO 4), sensor <i>wearable</i> , app para cuidadores, plataforma clínica y servicios inteligentes + <i>exergames</i> , durante 4 semanas, con sesiones de 20 minutos.	Estimula las funciones motoras y cognitivas (coordinación, velocidad, memoria).	Neuroplasticidad
22	Del Rosario-Montejo et al. (35)	2015	Experimental sin grupo control	España	Niños con parálisis cerebral y síndrome de Dandy-Walker	Método global de rehabilitación con caballos (GRMH) + hipoterapia, durante 4 meses, 1 sesión semanal de 45 minutos.	Mejora la función motora gruesa y la calidad de vida, con estimulación sensorial rítmica tridimensional.	Neuroplasticidad
23	Champagne et al. (36)	2023	Estudio de caso	Canadá	Paciente posictus	Comparación entre estimulación continua theta burst (cTBS), estimulación intermitente theta burst (iTBS) y sham en hemisferio no lesionado, con seguimiento a 3 meses.	Modula la excitabilidad cortical y la plasticidad motora.	Neurofisiológico
24	Bonini et al. (37)	2022	Revisión narrativa	Italia	Adultos y niños	AO de sistema de neuronas espejo + neuroimagen.	Facilita el reaprendizaje motor por imitación.	Neurofisiológico
25	Hernandez et al. (38)	2025	Estudio cuasiexperimental comparativo	Estados Unidos	Pacientes con EM	Entrenamiento de marcha simple + <i>dual task</i> con tareas cognitivas.	Mejora del rendimiento motor y cognitivo	Neuroplasticidad
26	Verschure et al. (39)	2023	Revisión narrativa	España	Paciente posictus	Sistema de juego de rehabilitación (RGS): Sistema RV basado en la teoría de control adaptativo distribuido (DAC).	Mejora la función bimanual, el aprendizaje predictivo y la retroalimentación multimodal.	Neuroplasticidad
27	Trindade et al. (40)	2025	Serie de casos	Portugal	Pacientes con EP	Fisioterapia + imaginación motora + AO, durante 4 semanas, 3 sesiones por semana. Observación en primera persona + práctica mental guiada	Potencia la plasticidad y la reorganización funcional.	Neuroplasticidad
28	Brassel et al. (41)	2021	Revisión sistemática	Australia	Paciente posictus, TCE o trastornos neurológicos crónicos	RV terapéutica con visores o HMDs interdisciplinaria: basado en principios de aprendizaje motor.	Mejora de la memoria prospectiva, la atención y el equilibrio funcional. Disminuye el estrés y la ansiedad.	Neuroplasticidad

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasiva; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

Tabla 2. (Continuación).

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
29	Gazerani et al. (42)	2025	Revisión narrativa	Oslo	Personas sanas y con trastornos neurológicos y/o psiquiátricos (ictus, dolor crónico, esquizofrenia, depresión, adicciones)	Se abordan mecanismos sinápticos, estructurales y neurogénicos modulados por fármacos y tecnologías.	Comprende y potencia los procesos neuroplásticos.	Neuroplasticidad
30	Fukumoto et al. (43)	2022	Estudio experimental correlacional causal	Japón	Adultos sanos	Imaginería motora + EMG: contracciones imaginadas del músculo tenar al 50 % de máxima contracción voluntaria.	Activación cerebral sin movimiento real con aumento significativo de oxihemoglobina.	Neurofisiológico
31	Huang et al. (44)	2025	Revisión narrativa	China	Adultos sanos y con alzhéimer, EP, ELA, depresión, TDAH, LM, TCE, pacientes posictus	Terapias multimodales avanzadas: combina terapias celulares (MSC, exosomas, células madre neuronales); neuromodulación (tDCS, TMS, DBS, VNS); cirugía neurorrestaurativas y farmacoterapia neuro activa.	Restaura la conectividad y la función neuromotora mediante estrategias integradas.	Neuroplasticidad-neurofisiológico
32	Chen et al. (45)	2023	Revisión narrativa	China	Pacientes con LM incompleta o crónica	Neuromodulación eléctrica: estimulación epidural, transcutánea y cortical + BCI.	Induce la reorganización cortical y la plasticidad sináptica funcional	Neuroplasticidad
33	Tavazzi et al. (46)	2022	Revisión sistemática	Estados Unidos	Paciente posictus	Ejercicio físico + terapia robótica + realidad virtual, imaginería motora + BCI.	Favorece la recuperación motora y funcional.	Neuroplasticidad
34	Akaiwa et al. (47)	2025	ECA	Japón	Adultos sanos	Estimulación cortical alterna sincronizada + estimulación propioceptiva con movimiento pasivo del dedo índice mediante dispositivo mecánico.	Modulación rítmica de la excitabilidad motora con mayor percepción sensorial.	Neuroplasticidad-neurofisiológico
35	Wu et al. (48)	2022	Scoping review	China	Paciente con EP	Entrenamiento de equilibrio + RV con plataformas no inmersivas (Kinect, Wii Fit, SilverFit 3D) vs. terapia convencional.	Mejora el equilibrio.	Neuroplasticidad
36	Tyler et al. (49)	2019	ECA	Estados Unidos	Pacientes con TCE	Estimulación eléctrica lingual + fisioterapia respiratoria y motora, durante 14 semanas, 3 veces por día.	Mejora el equilibrio, la marcha y el control motor.	Neuroplasticidad

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasivas; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

Tabla 2. (Continuación).

N.º	Autor	Año	Tipo de estudio	País	Población	Intervención/tratamiento	Resultados principales	Enfoque/perspectiva
37	Huo et al. (50)	2021	Revisión narrativa	China	Adultos mayores posictus, niños con trastornos del desarrollo (TDAH, TEA), enfermedades neurodegenerativas (enfermedad de Parkinson, alzhéimer)	Espectroscopia: herramienta de neuroimagen no invasiva que evalúa la actividad cerebral a través de la medición de la oxigenación cerebral durante tareas o terapias.	Monitoriza la reorganización cortical y la conectividad funcional. Evalúa la actividad cerebral en entornos clínicos reales.	Neurofisiológico
38	Burtscher et al. (51)	2024	Revisión narrativa	Suiza	Paciente con EP	Ejercicio físico terapéutico: aeróbico, resistencia, equilibrio, danza, acuático	Reduce síntomas motores y no motores.	Neuroplasticidad
39	Han et al. (52)	2023	Revisión narrativa	China	Sujetos sanos y con alteraciones neuropsiquiátricas (depresión mayor, esquizofrenia, TOC, ansiedad, EP, EM), pacientes posictus	rTMS: alta/baja frecuencia y theta burst, DTI, fMRI.	Modula la excitabilidad cortical y reorganiza redes funcionales y estructurales cerebrales. Mejora las funciones cognitivas y motoras.	Neuroplasticidad
40	Gabriel et al. (53)	2023	Revisión sistemática	Portugal	Paciente posictus, LM, EP, entre otras	Tecnologías de sensores y <i>wearables</i> : dispositivos para 10 MWT: acelerómetros, cámaras, sensores médicos; análisis predictivo de marcha	Mide y cuantifica el desempeño motor.	Neuroplasticidad
41	Panuccio et al. (54)	2016	Revisión narrativa	Italia	Enfermedades neurodegenerativas, epilepsia, LCT, paciente posictus trastornos psiquiátricos	Sistemas biohíbridos inteligentes: integración de tejidos neuronales biológicos + dispositivos electrónicos e IA (neuro prótesis, BCI, neuromoduladores).	Crea interacción funcional autónoma entre los sistemas biológicos y artificiales.	Neuroplasticidad-neurofisiológico
42	Sureshkumar y Yogarajan (55)	2021	Revisión narrativa	India	Paciente posictus, LM	Tecnología robótica para miembro superior/inferior, sistemas de ejercicio robótico; rTMS; interfaces cerebro-máquina; entornos de realidad virtual; dispositivos <i>wearables</i> .	La tecnología ha permitido nuevas maneras de promover la plasticidad, facilitar la participación del paciente, y conseguir resultados de rehabilitación más eficaces que solo terapia tradicional.	Neuroplasticidad

ECA: ensayo clínico aleatorizado; EP: enfermedad de Parkinson; EM: esclerosis múltiple; LM: lesión medular; TCE: trauma craneoencefálico; TEA: trastorno del espectro autista; ELA: esclerosis lateral amiotrófica; TDAH: trastorno déficit de atención e hiperactividad; TOC: trastorno obsesivo compulsivo; LCT: lesión cerebral traumática; tACS: estimulación transcraneal con corriente alterna; tDCS: estimulación transcraneal con corriente directa; BCI: interfaz cerebro-computador; FES: estimulación eléctrica funcional; RV: realidad virtual; EEG: electroencefalografía; TMS: estimulación magnética transcraneal; fNIRS: espectroscopia funcional de infrarrojo cercano; MNS: sistema de neuronas espejo; NIBS: estimulación cerebral no invasivas; TBS: estimulación de ráfaga theta; MSC: células estromales mesenquimales; DBS: estimulación cerebral profunda; VNS: estimulación del nervio vago; DTI: imágenes por tensor de difusión; fMRI: imágenes por resonancia magnética funcional; EMG: electromiografía; 10 MWT: prueba de marcha por 10 minutos; IA: inteligencia artificial; rTMS: estimulación magnética transcraneal repetitiva; AVD: actividades de la vida diaria.

De la muestra analizada (n = 42), 6 correspondieron a ensayos clínicos aleatorizados, 16 a revisiones narrativas, 3 a revisiones sistemáticas, 4 a estudios de casos y controles, y 13 a estudios experimentales, cuasiexperimentales o protocolos, entre otros. Los países con mayor representación en las publicaciones fueron Japón, China, Bélgica e Italia; asimismo, algunos estudios multicéntricos incluyeron aproximadamente 12 países adicionales. No obstante, no se identificaron estudios publicados en Latinoamérica, región donde los avances en neurorrehabilitación representan un hito fundamental para la práctica clínica.

Análisis e interpretación de resultados

Desde la perspectiva terapéutica en la práctica profesional, las nuevas tendencias en neurorrehabilitación y los avances terapéuticos propenden a la recuperación funcional y a la adaptabilidad del movimiento aprendido tras una lesión cerebral.

Avances en neurorrehabilitación y aplicaciones emergentes en la práctica clínica

Para consolidar el tratamiento de los pacientes, es imperativo el diseño de protocolos de intervención con dosificaciones o prescripciones de intensidad, duración y frecuencia, acordes con las diferentes alteraciones y como propuestas complementarias a la rehabilitación convencional. El estudio de Corrini et al. (30) aporta información valiosa sobre la intensidad de las sesiones de fisioterapia superiores a los 40 minutos, enfocadas en tareas específicas y adaptadas a las necesidades individuales. Igualmente, existe evidencia consistente (nivel 1) de que las intervenciones de alta intensidad mejoran el equilibrio y el rendimiento motor, particularmente en personas con esclerosis múltiple (28).

Se identificaron resultados positivos en el entrenamiento con dispositivos tecnológicos y retroalimentación multisensorial mediante la rehabilitación multimodal en adultos y niños. Estas propuestas integran principios de aprendizaje motor y actividades de doble tarea, combinando enfoques convencionales con enfoques emergentes (tabla 3). En una revisión sistemática, Pimentel-Ponce et al. (20) encontraron beneficios en la participación, motivación y adherencia de niños y adolescentes con parálisis cerebral mediante la variabilidad en sesiones multimodales que incluyeron gamificación, ejercicio físico y fisioterapia convencional. Estas estrategias no solo impactan en la recuperación del paciente, sino que fomentan una percepción positiva del cuidador frente al proceso rehabilitador.

Por otro lado, el uso de tecnologías como los dispositivos robóticos, la RV y otras aplicaciones innovadoras, combinadas con estrategias convencionales, representa

una oportunidad para ampliar la variabilidad terapéutica. Estas herramientas facilitan cambios significativos en el desempeño motor, la plasticidad cerebral y el *feedback* multisensorial, facilitando la transición hacia modelos de tratamiento más completos o híbridos.

Tabla 3. Propuestas combinadas en intervención multimodal.

Propuestas innovadoras	Propuestas convencionales
Neuromodulación no invasiva	Ejercicio físico
Realidad virtual	Hipoterapia
Plataformas interfaz cerebro-computadora	Practicar deportes (golf, tenis)
Estimulación magnética transcraneal	Programas de entrenamiento cognitivo
Inteligencia artificial asistida	Reaprendizaje motor orientada a la tarea
Neuromodulación-neuroimagen	Danza

Ensayos en pacientes con enfermedad de Parkinson y alteraciones del control postural indicaron que los programas estructurados de entrenamiento basados en RV inmersiva y multitarea aumentan la capacidad de adaptación postural y la función motora; sin embargo, la heterogeneidad en las dosis, la duración y la intensidad limitan su implementación (18, 26). El análisis por subgrupos del estudio de Wu et al. (48) sugiere una prescripción concisa para estos pacientes: sesiones de 20 minutos o entrenamiento intensivo de 201 a 300 minutos semanales (4 a 6 veces por semana) durante 3 a 5 semanas. Adicionalmente, el uso de RV inmersiva, semiinmersiva y juegos serios en entornos virtuales interactivos incrementa la motivación y la adherencia al tratamiento mediante la realización de sesiones personalizadas (28).

Intervenciones como la musicoterapia (22), la terapia ecuestre y la hipoterapia también generan cambios en la plasticidad neuronal al activar redes dopaminérgicas, destacando por su accesibilidad y costo moderado (22). Estos hallazgos se han observado tras períodos continuos de intervención en niños con parálisis cerebral, con sesiones semanales de 45 minutos, donde la interacción con diversos estímulos impulsa los canales sensoriales y de aprendizaje (35).

En relación con las alteraciones neurológicas recurrentes, como la enfermedad de Parkinson y el daño posictus o enfermedad cerebrovascular, las estrategias

convencionales, entre ellas los ejercicios en superficies estables o inestables, las tareas duales en actividades funcionales, el estiramiento y el fortalecimiento muscular (18, 38, 46, 52), mantienen su potencial de transferencia clínica. No obstante, su efectividad depende de que los entornos sean modificables y planteen retos constantes al paciente. Un último pilar esencial es el ejercicio físico y terapéutico, que mejora la funcionalidad, independientemente de la fase de evolución o el diagnóstico, brindando elementos suficientes para alcanzar un estado óptimo de bienestar y calidad de vida (25, 50).

Perspectivas teóricas predominantes sobre el control y aprendizaje motor

Se identificaron enfoques basados en la neuroplasticidad, teorías neurofisiológicas y neurociencia de sistemas, aplicados a la recuperación de la función motora y el control postural a través de la estimulación y entrenamiento dirigido. Estas perspectivas convergen en que la intervención temprana, repetitiva y multimodal favorece la reorganización funcional (14, 19). En esta revisión, 33 artículos describen la neuroplasticidad como el principio fundamental en la evolución de la rehabilitación tradicional hacia un proceso activo, participativo y autorregulado, incluso en condiciones de baja reversibilidad como las enfermedades neurodegenerativas (28). Diversos ensayos clínicos aleatorizados (15, 17, 20) demostraron que las intervenciones que combinan plataformas de interfaz cerebro-computadora, estimulación neuromoduladora y entrenamiento físico-funcional se fundamentan en la reorganización cortical adaptativa.

La utilidad de estas tecnologías abarca también procedimientos de registro y evaluación mediante herramientas validadas para el mapeo cortical y la monitorización de los procesos de plasticidad (15, 16, 20). No obstante, resulta esencial someter estas estrategias a validaciones rigurosas mediante una colaboración multidisciplinaria que integre la neurociencia, la ingeniería, la medicina y la bioética, como ejes fundamentales de la neurorrehabilitación.

Por otro lado, una menor cantidad de estudios se sustenta en principios neurofisiológicos con impacto en la neurobioquímica cerebral. Estos procesos actúan activando sistemas dopaminérgicos, modulando la conexión interneuronal cortical o inhibiendo la señalización interhemisférica, lo que influye en alteraciones de tipo neuropsiquiátrico. Por tanto, son aplicables a pacientes que no solo presentan lesión cerebral, sino también cuadros de depresión, ansiedad o esquizofrenia (29, 33).

DISCUSIÓN

La mayor parte de los estudios se centran en promover la neuroplasticidad como mecanismo de recuperación

funcional. Autores como Harada et al. (14) y Champagne et al. (36) sugieren que los efectos facilitadores en el aprendizaje motor inicial deben potenciar, a largo plazo, la plasticidad sináptica. Estos efectos, derivados de la práctica repetitiva y el entrenamiento de tareas, producen mejoras sinérgicas en el control y aprendizaje motor que, al combinarse con estrategias neurotecnológicas como la estimulación cerebral no invasiva, aumentan la conectividad y la reorganización neuronal (19, 24, 29).

Mientras algunos estudios priorizan la recuperación motora de la marcha y el equilibrio (30, 34, 49), otros se enfocan en la recuperación cognitiva de la memoria y la atención. Estos últimos exploran el papel de la corteza prefrontal en el control locomotor y la activación cognitiva mediante la implementación de estrategias de doble tareas (*dual task*) en pacientes con esclerosis múltiple (38).

La RV, descrita en protocolos de rehabilitación basados en metas, multimodalidad (21), aprendizaje predictivo y retroalimentación o *feedback* (27), se reconoce como una intervención ideal, principalmente en la fase posictus, ya que activa redes cerebrales distribuidas con mayores beneficios en etapas agudas que en etapas crónicas (32, 38, 40, 47). Por otro lado, la imaginería motora ha cobrado fuerza tras el descubrimiento de las neuronas espejo, abriendo vías de investigación sobre la relación acción-percepción, con el objetivo de establecer interacciones sociales más complejas, así como emociones y sensaciones diversas en la recuperación neurofuncional (47). Trindade et al. (40) han afirmado que la combinación de imaginería motora con la observación de acciones durante tareas específicas potencia la reorganización funcional y mejora la ejecución motora sin necesidad de esfuerzo físico directo.

Aunque existen investigaciones sobre interfaces computarizadas (18), el desafío actual consiste en trasladar estas tecnologías a entornos clínicos y domiciliarios. En estos contextos, el impacto suele ser únicamente interdisciplinario, lo que dificulta trascender a un modelo multidisciplinario. Además, se requiere su integración con modelos híbridos de rehabilitación (15, 52) que combinen la plasticidad biológica con el control preciso de la ingeniería. Esto constituye un nuevo paradigma en neurorrehabilitación basado en la sinergia entre biología e ingeniería, mediada por inteligencia artificial. Si bien se han descrito avances enfocados en desarrollos tecnológicos y mediaciones desde la inteligencia artificial, también mantienen su vigencia estrategias que demuestran validez científica a través de la mejora del desempeño psicomotor.

Hasta el momento, se han identificado tres estudios que recopilan información sobre estrategias innovadoras o emergentes en neurorrehabilitación (42, 44, 53). Se

trata de documentos descriptivos amplios que incluyen intervenciones farmacológicas, quirúrgicas, neurorestaurativas, entre otras. Sin embargo, no se hallaron investigaciones previas centradas exclusivamente en áreas de la rehabilitación física y funcional, por lo que esta constituye la primera revisión de alcance con dicha delimitación. Su aplicación clínica requiere superar limitaciones metodológicas, garantizar la equidad en el acceso y abordar dilemas éticos sobre la mejora cognitiva (34). De igual forma, se necesita una investigación colaborativa, longitudinal y transdisciplinaria para traducir el potencial de la neuroplasticidad en beneficios reales para la población.

A pesar de que la presente investigación ofrece un panorama mundial de la evidencia, esta sigue siendo heterogénea y requiere mayor calidad metodológica. Como mencionan Lv y Guo (28), Benadduci et al. (34) y Trindade et al. (40), el predominio de revisiones narrativas y estudios experimentales con muestras pequeñas o sin grupo control reduce la fuerza de las conclusiones y subraya la necesidad de ensayos clínicos multicéntricos.

En el campo de la neurorrehabilitación se observa una marcada heterogeneidad metodológica y variabilidad en las poblaciones. Esto responde al carácter emergente de este ámbito, que abarca diversas patologías del sistema nervioso central y periférico, lo que dificulta la obtención de muestras homogéneas y favorece el desarrollo de estudios con muestras pequeñas, no probabilísticas y clínicamente diversas.

La neurorrehabilitación se sustenta en el trabajo interdisciplinario de fisioterapeutas, fonoaudiólogos, terapeutas ocupacionales, neuropsicólogos y médicos fisiatras, entre otros especialistas. No obstante, la falta de alineación entre las perspectivas disciplinares, los marcos teóricos y las metodologías empleadas generan variaciones en la conceptualización, medición y reporte de los resultados terapéuticos.

Respecto al análisis del contexto en países como Colombia, se identifica una limitación en la aplicabilidad clínica, ya que la Clasificación Única de Procedimientos en Salud (CUPS) carece de códigos específicos para la fisioterapia neurológica o para intervenciones con tecnologías emergentes. Por consiguiente, a pesar de la generación de nuevo conocimiento científico, dicha situación nacional invisibiliza la complejidad del quehacer profesional y obstaculiza la consolidación de un modelo de atención innovador y sostenible.

CONCLUSIONES

La evidencia revisada sugiere un creciente interés en las intervenciones tecnológicas orientadas al control y el aprendizaje motor; sin embargo, se requieren estudios longitudinales y comparativos para confirmar la sostenibilidad de sus efectos. Actualmente, diversas investigaciones incluyen intervenciones de corta duración (4 a 6 semanas) sin un seguimiento a largo plazo que permita evaluar el mantenimiento de los cambios de los efectos neuroplásticos. A través de la investigación aplicada y la generación continua de conocimiento científico pertinente, contextualizado y multidisciplinario desde las neurociencias, el panorama resulta prometedor para fortalecer los avances en el campo de la neurorrehabilitación, impactando positivamente en la salud de la población en las diferentes etapas del ciclo vital.

Por su parte, las investigaciones futuras deben orientarse hacia la evaluación de la transferencia funcional en entornos habituales y en poblaciones neurodivergentes (TDAH, trastorno del espectro autista, trastornos del aprendizaje o deficiencia intelectual, tanto en niños como en adultos). En la presente revisión predominan los ensayos clínicos aleatorizados, lo que fortalece la evidencia empírica, mientras que las revisiones sistemáticas incluidas complementan la síntesis crítica de los resultados obtenidos.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Financiamiento:

Autofinanciado.

Contribución de autoría:

KGLH: diseño metodológico, interpretación de resultados, análisis formal, revisión crítica, edición final del manuscrito.

ZKIV: conceptualización, recolección de datos, redacción del borrador, revisión bibliográfica, gestión del proyecto.

Correspondencia:

Karen Ginneth López Hernández

✉ Karen.lopez@ecr.edu.co

REFERENCIAS

- Leon-Sarmiento FE, Bayona E, Bayona-Prieto J. Neurorrehabilitación: la otra revolución del siglo XXI. *Acta Méd Colomb* [Internet]. 2009; 34(2): 88-92. Disponible en: http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-24482009000200007
- Roemmich RT, Bastian AJ. Closing the loop: from motor neuroscienceto neurorehabilitation. *Annu Rev Neurosci* [Internet]. 2018; 41: 415-429. Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-080317-062245>
- Levin MF, Piscitelli D. Motor control: a conceptual framework for rehabilitation. *Motor Control* [Internet]. 2022; 26(4): 497-517. Disponible en: <https://doi.org/10.1123/mc.2022-0026>
- Maier M, Ballester BR, Verschure PF. Principles of neurorehabilitation after stroke based on motor learning and brain plasticity mechanisms. *Front Syst Neurosci* [Internet]. 2019; 13: 74. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fnsys.2019.00074>
- Latash ML, Levin MF, Scholz JP, Schöner G. Motor control theories and their applications. *Medicina* [Internet]. 2010; 46(6): 382-392. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/medicina46060054>
- Leech KA, Roemmich RT, Gordon J, Reisman DS, Cherry-Allen KM. Updates in motor learning: implications for physical therapist practice and education. *Phys Ther* [Internet]. 2022; 102(1): pzab250. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzab250>
- Gunduz ME, Bucak B, Keser Z. Advances in stroke neurorehabilitation. *J Clin Med* [Internet]. 2023; 12(21): 6734. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jcm12216734>
- Iandolo R, Marini F, Semprini M, Laffranchi M, Mugnosso M, Cherif A, et al. Perspectives and challenges in robotic neurorehabilitation. *Appl Sci* [Internet]. 2019; 9(15): 3183. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app9153183>
- Sucharew H, Macaluso M. Progress notes: methods for research evidence synthesis: the scoping review approach. *J Hosp Med* [Internet]. 2019; 14(7): 416-418. Disponible en: <https://doi.org/10.12788/jhm.3248>
- Peters MD, Marnie C, Tricco AC, Pollock D, Munn Z, Alexander L, et al. Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JB I Evid Synth* [Internet]. 2020; 18(10): 2119-2126. Disponible en: <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>
- Burduladze N, Jones LP, Jones BD, Pollock D, Munn Z, Alexander L, et al. Exploring power and power sharing in participatory health research partnerships: a scoping review protocol. *PLoS ONE* [Internet]. 2024; 19(7): e0303799. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303799>
- Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Syst Rev* [Internet]. 2016; 5(1): 210. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* [Internet]. 2021; 372: n71. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Harada T, Hara M, Matsushita K, Kawakami K, Kawakami K, Anan M, et al. Off-line effects of alpha-frequency transcranial alternating current stimulation on a visuomotor learning task. *Brain Behav* [Internet]. 2020; 10(9): e01754. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/brb3.1754>
- Yang S, Li R, Li H, Xu K, Shi Y, Wang Q, et al. Exploring the use of brain-computer interfaces in stroke neurorehabilitation. *Biomed Res Int* [Internet]. 2021; 2021: 9967348. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2021/9967348>
- Marino M, Mantini D. Human brain imaging with high-density electroencephalography: techniques and applications. *J Physiol* [Internet]. 2024; 604(2): 783-812. Disponible en: <https://doi.org/10.1113/JP286639>
- He XK, Sun QQ, Liu HH, Guo XY, Chen C, Chen LD. Timing of acupuncture during LTP-like plasticity induced by paired-associative stimulation. *Behav Neurol* [Internet]. 2019; 2019(1): 9278270. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2019/9278270>
- Gandolfi M, Sandri A, Menaspà Z, Avanzino L, Pelosin E, Geroin C, et al. How does postural control in patients with functional motor disorders adapt to multitasking-based immersive virtual reality? *Mov Disord Clin Pract* [Internet]. 2024; 11(4): 337-345. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/mdc3.13961>
- Liao WY, Hand BJ, Cirillo J, Sasaki R, Opie GM, Goldsworthy MR, et al. Gamma transcranial alternating current stimulation has frequency-dependent effects on human motor cortex plasticity induced by theta-burst stimulation. *Eur J Neurosci* [Internet]. 2025; 61(3): e70018. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/ejn.70018>
- Pimentel-Ponce M, Romero-Galisteo RP, Palomo-Carrión R, Pinero-Pinto E, Merchán-Baeza JA, Ruiz-Muñoz M, et al. Gamification and neurological motor rehabilitation in children and adolescents: a systematic review. *Neurología* [Internet]. 2024; 39(1): 63-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nrleng.2023.12.006>
- Oliveira I, Russo M, Almeida AI, Vourvopoulos A, Mendes Pereira C. Recommendations for combining brain-computer interface, motor imagery, and virtual reality in upper limb stroke rehabilitation: qualitative participatory design study. *JMIR Rehabil Assist Technol* [Internet]. 2025; 12: e71789. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/71789>
- Sihvonen AJ, Särkämö T, Leo V, Tervaniemi M, Altenmüller E, Soinila S. Music-based interventions in neurological rehabilitation. *Lancet Neurol* [Internet].

- 2017; 16(8): 648-660. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(17\)30168-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(17)30168-0)
23. Schachten T, Jansen P. The effects of golf training in patients with stroke: a pilot study. *Int Psychogeriatr* [Internet]. 2015; 27(5): 865-873. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/S1041610214002452>
 24. Talimkhani MM, Talimkhani A, Dinarvand V, Mohamadi S, Baharlouei H. The effects of multi-session dual-tDCS on the bilateral transfer of motor skill learning in patients with stroke. *Clin Neurophysiol Pract* [Internet]. 2025;10:236-245. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2025.06.005>
 25. Grünbaum T, Christensen MS. The functional role of conscious sensation of movement. *Neurosci Biobehav Rev* [Internet]. 2024; 164: 105813. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105813>
 26. Hardeman LE, van Bente E, Hoogendoorn EM, van Gameren M, Nonnekes J, Roerdink M, et al. Home-based augmented reality exercise for people with parkinson disease: qualitative acceptability study. *JMIR Rehabil Assist Technol* [Internet]. 2025; 12: e70802. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/70802>
 27. Dutta A, Das A. Platform technology for extended reality biofeedback training under operant conditioning for functional limb weakness: protocol for the coproduction of an at-home solution (React2Home). *JMIR Res Protoc* [Internet]. 2025; 14: e70620. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/70620>
 28. Lv Z, Guo J. Virtual reality neurorehabilitation. *Int J Ment Health Promot* [Internet]. 2022; 24(3): 287-310. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/ijmhp.2022.019829>
 29. Antonioni A, Raho EM, Straudi S, Granieri E, Koch G, Fadiga L. The cerebellum and the mirror neuron system: a matter of inhibition? from neurophysiological evidence to neuromodulatory implications. A narrative review. *Neurosci Biobehav Rev* [Internet]. 2024; 164: 105830. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105830>
 30. Corrini C, Gervasoni E, Perini G, Cosentino C, Putzolu M, Montesano A, et al. Mobility and balance rehabilitation in multiple sclerosis: a systematic review and dose-response meta-analysis. *Mult Scler Relat Disord* [Internet]. 2023; 69: 104424. Disponible en: [10.1016/j.msard.2022.104424](https://doi.org/10.1016/j.msard.2022.104424)
 31. Huang H, Bach JR, Sharma HS, Saberi H, Jeon SR, Guo X, et al. The 2022 yearbook of neurorestoratology. *J Neurorestoratology* [Internet]. 2023; 11(2): 100054. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnrt.2023.100054>
 32. Zaragoza-Mezquita M, Felix-Esbrí S, Sebastián-Tirado A, Guinot P, Melero C, Forn C, et al. Exploring the potential of immersive Virtual Reality (VR) as a tool to enhance cognitive functions and alleviate clinical symptoms in Multiple Sclerosis (MS): enhancing cognitive functions in multiple sclerosis using virtual reality. *Mult Scler Relat Disord* [Internet]. 2025; 93: 106235. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msard.2024.106235>
 33. Hussain M, Foglia SD, Park J, Ramdeo KR, Adams FC, Drapeau CC, et al. Ipsilateral contraction increases map area and decreases motor threshold for contralateral hand muscle. *Neuroscience* [Internet]. 2025; 586: 144-151. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2025.09.034>
 34. Benadduci M, Franceschetti C, Marziali RA, Frese S, Sándor PS, Tombolesi V, et al. An integrated Virtual Reality-based telerehabilitation platform to support recovery and maintenance of functional abilities among older adults: protocol for a usability and acceptability study. *JMIR Res Protoc* [Internet]. 2025; 14: e88023. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/88023>
 35. Del Rosario-Montejo O, Molina-Rueda F, Muñoz-Lasa S, Alguacil-Diego IM. Efectividad de la terapia ecuestre en niños con retraso psicomotor. *Neurología* [Internet]. 2015; 30(7): 425-432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2013.12.023>
 36. Champagne PL, Blanchette AK, Schneider C. Continuous, and not intermittent, theta-burst stimulation of the unlesioned hemisphere improved brain and hand function in chronic stroke: a case study. *Brain Disorders* [Internet]. 2023; 9: 100062. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dscb.2022.100062>
 37. Bonini L, Rotunno C, Arcuri E, Gallese V. Mirror neurons 30 years later: implications and applications. *Trends Cogn Sci* [Internet]. 2022; 26(9): 767-781. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.003>
 38. Hernandez ME, Motl RW, Foley FW, Izzetoglu M, Wagshul M, Holtzer R. Comparison of practice-related changes in dual task walking performance and neural efficiency between older adults with progressive and relapsing-remitting multiple sclerosis. *Mult Scler Relat Disord* [Internet]. 2025; 93: 106224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msard.2024.106224>
 39. Verschure PF, Páscoa dos Santos F, Sharma V. Redefining stroke rehabilitation: mobilizing the embodied goal-oriented brain. *Curr Opin Neurobiol* [Internet]. 2023; 83: 102807. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102807>
 40. Trindade MF, Carvalho R, Silva A. Motor imagery combined with action observation integrated with physiotherapy in patients with Parkinson disease: repercussions on functional capacity-case series study. *J Bodyw Mov Ther* [Internet]. 2025; 44: 161-169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2025.05.071>
 41. Brassel S, Power E, Campbell A, Brunner M, Togher L. Recommendations for the design and implementation of virtual reality for acquired brain injury rehabilitation: systematic review. *J Med Internet Res* [Internet]. 2021; 23(7): e26344. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/26344>
 42. Gazerani P. The neuroplastic brain: current breakthroughs and emerging frontiers. *Brain Res* [Internet]. 2025; 1858: 149643. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2025.149643>
 43. Fukumoto Y, Todo M, Bizen H, Kimura D, Suzuki T. Causal relationships between brain and spinal motor

- neuron excitability during motor imagery: using NIRS and evoked electromyogram study. *Neuroimage Rep* [Internet]. 2022; 2(1): 100083. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ynirp.2022.100083>
44. Huang H, Sanberg PR, Sharma HS, Bach JR, Saberi H, Shetty AK, et al. The 2024 yearbook of Neurorestoratology. *J Neurorestoratology* [Internet]. 2025; 13(6): 100250. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnrt.2025.100250>
 45. Chen M, Chen Z, Xiao X, Zhou L, Fu R, Jiang X, et al. Corticospinal circuit neuroplasticity may involve silent synapses: Implications for functional recovery facilitated by neuromodulation after spinal cord injury. *IBRO Neurosci Rep* [Internet]. 2023; 14: 185-194. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.08.005>
 46. Tavazzi E, Bergsland N, Pirastru A, Cazzoli M, Blasi V, Baglio F. MRI markers of functional connectivity and tissue microstructure in stroke-related motor rehabilitation: a systematic review. *Neuroimage Clin* [Internet]. 2022; 33: 102931. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102931>
 47. Akaiwa M, Kurokawa R, Matsuda Y, Sugawara Y, Kosuge R, Saito H, et al. Enhancement of beta rebound elicited by proprioceptive stimulation in the sensorimotor cortex by transcranial alternating current stimulation matched to the dominant beta frequency. *Neurosci Res* [Internet]. 2025; 216: 104896. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.neures.2025.03.008>
 48. Wu J, Zhang H, Chen Z, Fu R, Yang H, Zeng H, et al. Benefits of virtual reality balance training for patients with Parkinson disease: systematic review, meta-analysis, and meta-regression of a randomized controlled trial. *JMIR Serious Games* [Internet]. 2022; 10(1): e30882. Disponible en: <https://doi.org/10.2196/30882>
 49. Tyler M, Skinner K, Prabhakaran V, Kaczmarek K, Danilov Y. Translingual neurostimulation for the treatment of chronic symptoms due to mild-to-moderate traumatic brain injury. *Arch Rehabil Res Clin Transl* [Internet]. 2019; 1(3-4): 100026. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2019.100026>
 50. Huo C, Xu G, Li W, Xie H, Zhang T, Liu Y, et al. A review on functional near-infrared spectroscopy and application in stroke rehabilitation. *Med Nov Technol Devices*. 2021; 11: 100064. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100064>
 51. Burtscher J, Moraud EM, Malatesta D, Millet GP, Bally JF, Patoz A. Exercise and gait/movement analyses in treatment and diagnosis of Parkinson's disease. *Ageing Res Rev* [Internet]. 2024; 93: 102147. Disponible en: [10.1016/j.arr.2023.102147](https://doi.org/10.1016/j.arr.2023.102147)
 52. Han X, Zhu Z, Luan J, Lv P, Xin X, Zhang X, et al. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation and their underlying neural mechanisms evaluated with magnetic resonance imaging-based brain connectivity network analyses. *Eur J Radiol Open* [Internet]. 2023; 10: 100495. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2023.100495>
 53. Gabriel CL, Pires IM, Coelho PJ, Zdravevski E, Lameski P, Mewada H, et al. Mobile and wearable technologies for the analysis of Ten Meter Walk Test: a concise systematic review. *Heliyon* [Internet]. 2023; 9(6): e16599. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16599>
 54. Panuccio G, Semprini M, Chiappalone M. Intelligent biohybrid systems for functional brain repair. *New Horiz Transl Med* [Internet]. 2016; 3(3-4): 162-174. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nhtm.2016.10.001>
 55. Sureshkumar S, Yogarajan K. Technological advancement to neurorehabilitation [Internet]. *Neurocosm Int J* [Internet]. 2021; 2(1): 17-22. Disponible en: <https://www.neurocosm.net/article/technological-advancement-neurorehabilitation.pdf>