

## ARTÍCULO DE REVISIÓN

DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59834>

# Entrenamiento motor en el continuo de la realidad a la virtualidad

*Motor Training from reality to virtuality*

Recibido: 31/08/2016 Aceptado: 24/01/2017

Martha Torres-Narváez<sup>1</sup> • Juanita Sánchez-Romero<sup>1</sup> • Andrea Pérez-Viatela<sup>1</sup> • Estefanía Betancu<sup>1</sup> • Jenny Villamil-Ballesteros<sup>1</sup> Karen Valero-Sánchez<sup>1</sup><sup>1</sup> Universidad del Rosario - Escuela de Medicina y Ciencias de la Salud - Grupo de Investigación Ciencias de la Rehabilitación - Bogotá D.C. - Colombia.

Correspondencia: Martha Torres-Narváez. Programa de Fisioterapia, Escuela de Medicina y Ciencias de la Salud, Universidad del Rosario. Carrera 24 No. 63C-74. Teléfono: +57 1 2970200, ext.: 3453. Bogotá D.C. Colombia. Correo electrónico: martha.torres@urosario.edu.co.

## | Resumen |

**Introducción.** La transformación de la capacidad de movimiento de las personas es un reto que el fisioterapeuta asume como estrategia de aprendizaje motor.**Objetivo.** Plantear los referentes teóricos y prácticos más relevantes en el uso de ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad en el entrenamiento motor de pacientes con accidente cerebrovascular y enfermedad de Parkinson.**Materiales y métodos.** Revisión de la literatura que analiza y aporta de manera conceptual, en el área de la rehabilitación y la fisioterapia, información sobre entrenamiento y aprendizaje motor.**Resultados.** Se evidencia potencial en el uso de la realidad virtual para la rehabilitación de alteraciones del movimiento debidas a disfunciones neurológicas. Las herramientas tecnológicas propias de la realidad virtual permiten un mayor conocimiento de los resultados con respecto a las características del movimiento, lo cual ayuda a mejorar el aprendizaje motor, en comparación con el entrenamiento tradicional.**Conclusiones.** Se debe objetivar el proceso de rehabilitación para medir con precisión los cambios de las estrategias de aprendizaje en las capacidades de movimiento de personas con deficiencias del sistema neuromuscular y generar evidencia del impacto que tienen los programas de entrenamiento motor en el continuo de la realidad a la virtualidad.**Palabras clave:** Actividad motora; Interfaz usuario-computador; Enfermedad de Parkinson; Accidente cerebrovascular; Fisioterapia (DeCS).

## | Abstract |

**Introduction:** The transformation of people's movement capacity is a challenge that physiotherapists address as a motor learning strategy.**Objective:** To gather the most relevant theoretical and practical references on the use of therapeutic environments in the reality-virtuality continuum regarding motor training in stroke and Parkinson's patients.**Materials and methods:** Literature review that analyzes and contributes conceptual information on training and motor learning in the field of rehabilitation and physiotherapy.**Results:** The potential of the use of virtual reality in movement disorder rehabilitation processes due to neurological dysfunctions is observed. The technological tools for virtual reality allow a better understanding of the results with respect to the characteristics of the movement, which helps to improve motor learning in comparison with traditional training.**Conclusions:** It is necessary to objectify the rehabilitation process to accurately measure the changes generated by learning strategies in the movement abilities of patients with neuromuscular system disorders in order to obtain evidence of the impact that motor training programs have on the reality-virtuality continuum.**Keywords:** Motor Activity; Use-computer interface; Parkinson's Disease; Stroke; Physical therapy specialty (MeSH).

Torres-Narváez M, Sánchez-Romero J, Pérez-Viatela A, Betancu E, Villamil-Ballesteros J, Valero-Sánchez K. Entrenamiento motor en el continuo de la realidad a la virtualidad. Rev. Fac. Med. 2018;66(1):117-23. Spanish. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59834>.

Torres-Narváez M, Sánchez-Romero J, Pérez-Viatela A, Betancu E, Villamil-Ballesteros J, Valero-Sánchez K. [Motor Training From Reality To Virtuality]. Rev. Fac. Med. 2018;66(1):117-23. Spanish. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59834>.

## Introducción

El fisioterapeuta está comprometido con el desarrollo y la calidad de vida de las personas; este compromiso lo asume a partir de la gestión del conocimiento en su desempeño profesional. La práctica clínica le permite a estos profesionales identificar los diferentes aspectos que inciden en la capacidad de movimiento de las personas, los cuales son evidentes en el desempeño que tienen en las actividades de su repertorio funcional.

Transformar la capacidad de movimiento de las personas es un reto que el fisioterapeuta asume con estrategias de aprendizaje motor desde diferentes enfoques terapéuticos. Este documento plantea los principales referentes teóricos y prácticos del uso de ambientes virtuales en procesos de entrenamiento motor dirigidos a pacientes con enfermedad de Parkinson (EP) y accidente cerebrovascular (ACV). El enfoque de estos procesos se orienta al abordaje clínico terapéutico para la rehabilitación funcional. El desarrollo y uso de la tecnología puede optimizar los procesos de intervención terapéutica, pues genera ambientes enriquecidos que dinamizan el aprendizaje motor y arroja información objetiva del desempeño del paciente para medir el progreso del mismo.

Esta revisión tiene como objetivo describir los referentes teóricos y prácticos más relevantes en el uso de ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad y utilizados en los procesos de entrenamiento motor en pacientes con EP y ACV. Este planteamiento atiende los intereses de la línea clínica en rehabilitación del Grupo de Investigación de Ciencias de la Rehabilitación en relación con el estudio de las mediciones diagnósticas e intervenciones que disminuyan el daño y optimicen las capacidades motoras de las personas.

En este sentido, el texto se organiza en tres apartados, el primero que plantea la estructura del entrenamiento motor, el segundo que presenta aspectos generales de ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad y el tercero que sintetiza algunas experiencias terapéuticas que en dichos ambientes son reportadas en la literatura durante el proceso de rehabilitación de personas con EP y ACV.

## Materiales y métodos

Se realizó una revisión de la literatura a partir de la cual se plantean los referentes teóricos y prácticos más relevantes del uso de la tecnología y los ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad para soportar el proceso de entrenamiento motor.

Se realizó una búsqueda en las bases de datos PubMed, Scopus y Medline con las palabras claves “virtual reality”, “stroke recovery”, “parkinson disease”, “motor learning” and “rehabilitation”. Fueron analizados los artículos que en los últimos 10 años incluyeran experiencias terapéuticas a través del uso de la realidad virtual en pacientes con EP y ACV.

Se seleccionaron estas patologías neurológicas por su alta prevalencia, por su pronóstico funcional negativo y por la importancia que tiene la toma de decisiones clínicas por parte del fisioterapeuta en el proceso de rehabilitación de pacientes con estas enfermedades. La EP tiene una tasa cruda de incidencia anual de 4.5-19 por cada 100 000 habitantes al año; la tasa cruda de prevalencia es de 18-328 por cada 100 000 habitantes (1). En Colombia, la EP afecta 4.7 personas mayores de 50 años por cada 1 000 habitantes (2).

Según la OMS, el ACV produce la muerte de cerca de 5.7 millones de personas por año. En Colombia, esta es la tercera causa de muerte y una de las enfermedades que genera mayor limitación para la movilidad (3).

La información se trianguló identificando las variables y estrategias que soportan el entrenamiento motor a través de la realidad virtual y su impacto en el desempeño funcional, reportando así experiencias de rehabilitación motora en las patologías seleccionadas con anterioridad.

## Resultados

### Entrenamiento motor

Mediante la intervención del fisioterapeuta, los pacientes pueden adquirir habilidades motoras para realizar con mayor independencia las tareas de la vida diaria a partir de sus capacidades de manipulación, estabilidad y movilidad (4). Este proceso de rehabilitación puede incluir, en el marco del entrenamiento motor, el uso de dispositivos tecnológicos que generen ambientes terapéuticos en un continuo de la realidad a la virtualidad en el que se brinde retroalimentación visual y auditiva; en este contexto también es posible que el usuario perciba la sensación de que está manipulando objetos reales (5).

El fisioterapeuta gestiona el aprendizaje motor a través de la parametrización de la actividad y a partir de la definición de variables como intensidad, frecuencia, repetición y variabilidad del estímulo enviado. Los datos del desempeño del paciente se obtienen de forma sistemática en un contexto de seguridad mediado por un ambiente controlado y en el que se genera una continua realimentación hacia el usuario de acuerdo con el objetivo terapéutico y con su desempeño durante la tarea motora.

La eficacia de las intervenciones con realidad virtual para la rehabilitación de pacientes con EP o ACV está muy relacionada con la generación de imágenes y objetos virtuales que provocan múltiples estímulos sensoriales que a su vez conllevan a estímulos motores, los cuales deben estar fundamentados en los fines terapéuticos (6,7). De esta manera, se optimizan los efectos de la intervención sobre los resultados de la función corporal, al punto de hacer aportes a la minimización de los movimientos compensatorios en pacientes con limitación funcional de la movilidad (8).

Los ambientes terapéuticos, en el continuo de la realidad a la virtualidad, permiten al fisioterapeuta gestionar procesos de aprendizaje (9) a partir de la activación de cinco elementos de adaptación neuromuscular:

La *cognición*, que se refiere al proceso mental en el cual el paciente es consciente y está atento al movimiento, a los objetivos y a la meta en torno a los cuales es capaz de tomar decisiones, incluye memoria, planeación y flexibilidad cognitiva.

La *atención*, que es la condición de alerta que permite a la persona capturar información del contexto y reconocer sus aciertos y errores.

La *realimentación*, que consiste en el conocimiento de resultados y puede ser intrínseca desde la propiocepción o extrínseca desde instrucciones verbales, señales visuales o contactos manuales.

La *repetición*, que es la práctica constante de la actividad que permite la creación de patrones motores a partir de la experiencia.

La *similitud y transferencia*, que se refiere al grado de concordancia entre las actividades terapéuticas y el ambiente real de la ejecución de la tarea motora, la cual le permite a los usuarios disponer de sus capacidades motoras en los entornos en los que se desempeña (4).

En el proceso de aprendizaje motor, el fisioterapeuta parametriza la intervención adecuando las actividades en las fases cognitiva, asociativa y autónoma (10). Estas fases pueden ser mediadas por el uso del continuo de la realidad a la virtualidad al activar las funciones

ejecutivas para la resolución de un problema motor y estimular la plasticidad cerebral en los procesos de rehabilitación funcional, en especial en las etapas aguda y subaguda para el entrenamiento de la fuerza, la coordinación viso motora y el equilibrio (11,12); los efectos se pueden mantener durante un período de al menos 3 años (13). Este tipo de entrenamiento contribuye a la producción y el refinamiento de habilidades de secuencias de movimiento set postural (14,15).

De igual forma, se aprovecha el uso de señales sensoriales — auditivas, visuales y somatosensoriales —, las cuales han demostrado tener importancia en el aprendizaje motor al favorecer, de forma específica, el patrón de marcha en cuanto a velocidad, longitud y frecuencia de paso (16).

Los programas de entrenamiento motor que promueven el aprendizaje requieren ser direccionados por un experto en análisis de movimiento con habilidad metacognitiva para planificar las estrategias requeridas en cada situación y de acuerdo con las demandas, expectativas y necesidades de movimiento de los individuos. La interacción fisioterapeuta-paciente aporta elementos como el estilo de aprendizaje preferente que contribuye al análisis de los procesos y resultados terapéuticos y genera estrategias que mejoran la conciencia corporal y el manejo del cuerpo para el mantenimiento a largo plazo de los logros funcionales.

### Ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad

En el espectro continuo que lleva de la realidad a la virtualidad existen interrelaciones estructuradas en función de la cantidad y tipo de elementos reales y virtuales que conforman el ambiente terapéutico en el que el fisioterapeuta gestiona el entrenamiento motor mediante el envío y retroalimentación de diversos estímulos sensoriomotores, los cuales se logran a través de interfaces y transductores que convierten una variable física en una señal digital electrónica. El ambiente terapéutico puede utilizar sistemas inmersivos, semiinmersivos y no inmersivos. El primero de estos sitúa al paciente en un ambiente virtual en el que no le es posible diferenciar la realidad de la simulación creada, mientras que en el segundo y tercero el paciente puede diferenciar el contexto y los estímulos reales percibidos con facilidad (17).

Existe otra tecnología, la realidad aumentada, que permite modelar el movimiento de las personas y generar retroalimentación visual de las tareas realizadas (18). Los ambientes de realidad virtual utilizan la integración sensorial y la actividad cognitiva durante la ejecución de la tarea motora (19) a través de estrategias como la imaginación, la interacción con el ambiente virtual y la inmersión. El propósito de esta última es lograr que el usuario obvie todos los estímulos que indican que la experiencia que se presenta no es real y, así, estimular la anticipación de la respuesta motora frente al estímulo presentado en el escenario virtual (20).

Estas estrategias suelen abordarse mediante la integración de tecnologías como la computación gráfica —en particular la animación 3D en tiempo real—, los sistemas de captura de movimiento, los sistemas de seguimiento no basados en visión por computador y la tecnología háptica.

A través de la computación gráfica es posible generar escenas tridimensionales que emulan la percepción visual de escenarios realistas para su reproducción en el mundo virtual; en estos, el fisioterapeuta, a través de estímulos visuales y auditivos, orienta la actividad motora y dinamiza el aprendizaje del movimiento.

Los sistemas de captura de movimiento utilizan visión por computador, con o sin marcadores, dependiendo de los algoritmos y métodos de detección y seguimiento de objetos y regiones. Los

sistemas de captura de movimiento inerciales emplean sensores físicos para detectar la aceleración del objeto al que se encuentran adheridos y trasladan el movimiento real y el comportamiento motor del usuario a una representación propia del mundo virtual, ofreciendo así mayores grados de inmersión y reconstruyendo el movimiento para su medida y caracterización cuantitativa y cualitativa durante la ejecución de determinadas tareas motoras.

Las interfaces hápticas, a partir de la percepción de estímulos táctiles, logran generar la sensación de interacción física con el ambiente virtual, brindando retroalimentación de tipo vibro-táctil, táctil y kinestésica. Este tipo de estímulo tiene un interés especial en la búsqueda de un mejor desempeño de la tarea motora a través del principio de acción-reacción (21).

El procesamiento de la información háptica inicia con el proceso de generación, emisión y percepción de los estímulos, los cuales activan circuitos sensoriomotores en el usuario. A partir de estos circuitos, el usuario elige y ejecuta el patrón motor activando los grupos musculares que correspondan a la tarea funcional definida por el fisioterapeuta (21).

A través de las tecnologías descritas, el fisioterapeuta puede dosificar el grado de inmersión y la relevancia de los estímulos presentados al paciente por medio de los dispositivos de interacción hombre-máquina correspondientes con su respectiva respuesta desde las dimensiones sensoriales básicas: espacialidad, temporalidad, frecuencia, modalidad e intensidad.

Los resultados en la ejecución de la tarea motora están mediados por la calidad y velocidad de la realimentación sensorial o *biofeedback*, el cual le permite conocer al paciente la calidad y cantidad de la respuesta corporal utilizada para resolver problemas de movilidad, ganando conciencia de activación muscular durante la ejecución de actividades funcionales.

La retroalimentación sensorial en ambientes virtuales se puede adecuar para que sea continua, discontinua o proporcional a la capacidad del individuo de desarrollar determinada tarea motora; sin embargo, la opción de preferencia es la continua, pues tiene el fin de favorecer la activación de mecanismos en tiempo real para una activación muscular que permita ejecutar con éxito la tarea motora.

Las intervenciones terapéuticas orientadas al entrenamiento motor a través de la interacción hombre-máquina, en especial aquellas formuladas para su ejecución en entornos simulados, deben diseñarse a partir de la definición de parámetros como la frecuencia, intensidad, duración, desplazamiento y velocidad de los estímulos para la ejecución de la tarea motora.

Los resultados del desempeño del individuo en la ejecución de la tarea motora pueden ser registrados de manera cuantitativa, como fue descrito con anterioridad, a través de técnicas de seguimiento del movimiento con sensores ópticos o inerciales (22), además de otro tipo de transductores del comportamiento del paciente como señales de electromiografía o superficies sensibles a la presión como plataformas de fuerza o plantillas, lo cual permite medir la evolución y efectividad de la intervención terapéutica.

La literatura reporta la efectividad en el uso de la tecnología para el entrenamiento motor de pacientes con diferentes enfermedades: daño cerebral adquirido como ACV y trauma craneoencefálico; enfermedades neuromusculares como distrofias, miopatías, amiotrofias y neuropatías, y enfermedades neurodegenerativas como esclerosis múltiple, esclerosis lateral amiotrofia, Alzheimer y Parkinson (23,24).

A continuación se describen algunas experiencias significativas del entrenamiento motor en el continuo de la realidad a la virtualidad en dos de las enfermedades neurológicas más prevalentes en el mundo: EP y ACV.

## Experiencias terapéuticas en enfermedad de Parkinson

La EP es una enfermedad neurológica que resulta de la degeneración progresiva de las células dopaminérgicas en los ganglios basales del cerebro; se caracteriza por manifestaciones motoras como temblor de reposo, bradicinesia, rigidez e inestabilidad postural. La intervención desde fisioterapia es esencial en el manejo de pacientes con EP (25,26), pues para controlar el deterioro funcional se hace necesario el diseño de programas de rehabilitación que promuevan un óptimo desempeño motor y aporten a la calidad de vida de los usuarios (27).

En la EP, la forma de apropiar y transferir las habilidades motoras generadas es aún un reto. Por esta razón, es recomendable el uso de diversas estrategias de entrenamiento en el continuo de la realidad a la virtualidad (28) a pesar de que son necesarios más estudios para validar el tipo, frecuencia e intensidad del entrenamiento motor efectivo (29).

En el mundo existen diversas experiencias en la rehabilitación de personas con EP a través de ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad. En general, la literatura reporta aumento en la amplitud del movimiento, recuperación del equilibrio y cambios en el patrón de marcha (30-32) luego de un entrenamiento en el que se imitan patrones motores personalizados que se observan a través de realidad virtual. Se espera conocer el efecto de estos cambios a largo plazo.

El compromiso del funcionamiento de los circuitos cognitivos prefrontales de los pacientes con EP afecta la fase inicial del aprendizaje. Esta dificultad se puede contener, haciendo uso de la realidad virtual, a través de la realimentación propioceptiva, de la demanda de atención con tareas duales o claves visuales o auditivas y con motivación (recompensa ante logros).

En cuanto al entrenamiento de la marcha, se puede mejorar la velocidad y la longitud de paso, así como la cadencia, estabilidad, ritmicidad y excursión articular (33).

La literatura también reporta que la inestabilidad postural es otro signo que ha sido manejado integrando la realidad virtual en el proceso de rehabilitación. Doná *et al.* (34) observaron menor área de los límites de estabilidad y mayor área de oscilación del centro de masa en un grupo de pacientes.

Del mismo modo, mejoras en la marcha, equilibrio y aptitud cardiopulmonar fueron reportadas en un estudio realizado en Brasil, donde se involucró entrenamiento motor con Xbox Kinect Adventures. Los test clínicos que validaron estos cambios fueron el BESTest, el índice de marcha dinámica, el test de marcha de seis minutos y el cuestionario de enfermedad de Parkinson (35).

Otro estudio comparó los resultados entre la realidad virtual, para lo que se basó en entrenamiento con Nintendo Wii fit, ejercicio convencional y no entrenamiento, y evidenció en los primeros grupos mejoría en velocidad de la marcha, longitud y ancho de paso, fuerza muscular y habilidad de integración de diferentes sistemas sensoriales importantes para el control postural, con mejores resultados en el sistema vestibular. Los logros persistieron al menos un mes post-entrenamiento; sin embargo, no se encontraron diferencias significativas con el grupo de ejercicio convencional a excepción del sistema visual, el cual obtuvo mejores resultados, quizás asociados al flujo masivo óptico generado por el entorno virtual (36,37).

Estudios reportan en pacientes con EP en estadios Hoehn y Yahr 1 a 3 mejor desempeño en equilibrio dinámico al cruzar obstáculos, excursión máxima, mayor velocidad del movimiento y ancho de paso durante la marcha luego de realizar entrenamiento con Nintendo Wii. La habilidad en la integración sensorial es un factor importante que también se ha estudiado; por ejemplo, se ha reportado el efecto de

claves visuales en el conocimiento de resultados para controlar el movimiento. Estos cambios se correlacionaron con pruebas clínicas de Time up and Go, Cuestionario en EP-PDQ39- y test de organización sensorial (38,39).

En Alemania se han utilizado gafas inteligentes para dar claves auditivas y visuales durante actividades de la vida diaria con buenos resultados en el patrón de marcha y reconocimiento de objetos en tiempo real. Los pacientes se interesaron en esta estrategia, sin embargo también manifestaron su preocupación por el costo, apariencia, eficacia y efectos colaterales potenciales que pudieran surgir (40).

Por otro lado, un estudio que basó su hipótesis en los efectos que podría tener la realidad virtual basada en la retroalimentación visual versus el entrenamiento convencional no encontró diferencias significativas en la mejora del balance postural; sin embargo, esta investigación concluyó que el entrenamiento con realidad virtual es una alternativa flexible para dar continuidad al trabajo en casa, a través del desarrollo de actividades terapéuticas supervisadas. Este tipo de entrenamiento incorpora elementos de juego y competencia, lo que implica puntuaciones que determinan o evidencian la mejoría en el proceso de rehabilitación, siendo esto un incentivo para el paciente con EP (31).

Tzallas *et al.* (41) diseñaron PERFORM, un sistema de monitoreo de signos motores con sensores inerciales que permite ajustar los horarios de la medicación y personaliza el tratamiento de pacientes con EP registrando la cantidad de síntomas motores como temblor, bradicinesia y congelamiento de la marcha. Este registro se relacionó con la dosis de levodopa y brindó información relevante para orientar la ruta terapéutica.

En cuanto a la actividad motora fina, la literatura reporta el entrenamiento de la tarea de manipulación por micrografía en pacientes con estadios 1 a 3 de Hoehn y Yahr en fase on de la medicación, encontrando que luego de un periodo de 6 semanas entrenando trazos amplios de movimiento y utilizando lápiz, papel y *tablet* 30 minutos por día 5 días a la semana se logró transferencia y automatización de la tarea. Se evidenció una mayor y variada amplitud del trazo con persistencia de resultados durante 6 semanas después del entrenamiento (42).

Un estudio realizado en Boston y Amsterdam indagó acerca del efecto de las claves visuales en pacientes parkinsonianos en estadios 2 y 3 de Hoehn y Yahr, los cuales fueron expuestos a un programa de realidad virtual para el entrenamiento del balance durante 6 semanas; se demostró que la realidad virtual presenta efectos positivos en la capacidad de utilizar la información vestibular para el control postural, con poco o nulo sentido de la visión y somatización. Lo anterior se realizó por medio de un estudio de posturografía computarizada, dentro del cual los pacientes debían realizar una o dos tareas relacionadas con el equilibrio, las relaciones sensoriales y la reacción verbal, factores medidos con test de integración sensorial (43).

Un estudio realizado en Australia analiza la manera en que el entrenamiento con realidad virtual genera claves ambientales que los pacientes deben controlar mediante la activación de circuitos dependientes de la dopamina, los cuales permiten manejar los episodios de congelamiento de la marcha (44).

Esta gran variedad de estudios exponen el valor del uso de la tecnología para la valoración y rehabilitación de personas con EP que, por su condición, presentan alteraciones en el desempeño motor.

## Experiencias terapéuticas en accidente cerebro vascular

A nivel clínico, el ACV se expresa según el área lesionada y la severidad del daño. La intervención de fisioterapia está enfocada en minimizar las limitaciones en la movilidad y mejorar la precisión

y velocidad de los movimientos, la coordinación visomotora y el manejo espacial.

En el mundo existen diversas experiencias en la rehabilitación de personas con ACV a través de ambientes terapéuticos en el continuo de la realidad a la virtualidad. La literatura reporta efectos positivos en la rehabilitación de la movilidad y el equilibrio.

En Corea, se estudiaron en diez pacientes los efectos de la rehabilitación a través de la realidad virtual sobre la reorganización cortical y la recuperación del aparato locomotor asociado en pacientes con ACV. La recuperación del aparato locomotor fue medida antes y después de la intervención mediante resonancia magnética funcional y se aplicaron pruebas clínicas estandarizadas del equilibrio. Los hallazgos sugirieron que la rehabilitación con realidad virtual podría inducir la reorganización cortical ipsilateral y producir mejoras significativas en la función motora (45,46).

Otro estudio desarrolló un sistema basado en el juego interactivo específico para el desarrollo de tareas motoras de miembro superior posterior al ACV. En este ensayo clínico se encontraron mejoras significativas en la atención y la precisión del movimiento en miembros superiores (47).

En Korea se utilizó el entrenamiento con realidad virtual en pacientes con secuelas de ACV con hemiplejía a través del sistema de *Biofeedback*, que consiste en un programa de juego virtual de reporte de datos cinemáticos que registra el desempeño de ciertas actividades funcionales con el uso de un monitor, guantes de datos y cámaras de video. Las variables de medida fueron la habilidad de percepción visual (diferencia visual, figura y fondo, memoria visual, cierre visual y relaciones espaciales) y la función de los miembros superiores. Se encontraron diferencias significativas para la funcionalidad del brazo y mano con la medida del Wolf Motor Function Test (WMFT); para la percepción visual, en específico la diferencia visual, la figura y el fondo, se tomaron medidas con la prueba The Motor-Free Visual Perception Test (48).

En Taiwan, investigadores desarrollaron un guante para la rehabilitación de la motricidad fina, con este se integra la realidad virtual en un entorno interactivo. El dispositivo háptico está equipado con pequeños motores de vibración para la retroalimentación vibrotáctil y sensores de fuerza para la evaluación de la función motora (49).

Investigadores de Italia y Polonia desarrollaron un estudio en el que utilizaron la terapia reinforced feedback in virtual environment (RFVE) como método innovador para rehabilitación, este se basa en la ejecución de tareas repetitivas de miembro superior. Se demostró que esta terapia, en pacientes con secuelas de ACV, promueve el campo de aprendizaje en los déficits motores de miembro superior. Además, cuando se realizó en combinación con rehabilitación neuromotora tradicional, evidenció mejores beneficios tanto en grupos isquémicos como hemorrágicos (50,51).

El sistema de realidad virtual IREX ha comprobado sus efectos benéficos sobre el balance dinámico y la función de marcha en términos de velocidad, en especial en pacientes crónicos. La función clínica de la marcha y el análisis espaciotemporal biomecánico evidencian beneficios significativos en la cadencia, longitud y tiempo de paso y en la velocidad de la marcha. De esta manera, después de la intervención con realidad virtual y de un aumento del balance dinámico y la velocidad de la marcha, los pacientes con secuelas del ACV pueden adquirir de nuevo habilidades motoras adaptativas que les permita utilizar estrategias de ajustes posturales anticipatorios (52).

Los sistemas de realidad virtual que incluyen las aplicaciones de videojuego se pueden combinar con la rehabilitación convencional para contribuir con mayor eficacia en la recuperación del paciente con secuelas de ACV. Se encontraron mejoras significativas post-entrenamiento medidas con Fugl-Meyer, Wolf Motor Function

Test y la Escala de Independencia Funcional FIM. También fueron reportados efectos positivos en el rango de movimiento, destreza unilateral, fuerza de agarre, desempeño motor y velocidad (53).

## Discusión

No hay estudios concluyentes que permitan establecer de manera consistente el impacto que a largo plazo tienen los programas de entrenamiento motor en pacientes con EP y ACV que participan en procesos de rehabilitación que incluyen realidad virtual; esto debido a la carencia de mediciones estandarizadas comparables que permitan identificar con precisión los desenlaces motores y a la limitada descripción que realizan de los sistemas tecnológicos utilizados en el proceso terapéutico (34,47). En general, los estudios reportan mejoras significativas en el control motor por los cambios en las variables que dan cuenta del desempeño de los pacientes con EP y ACV en la ejecución de la marcha, el equilibrio y la función del miembro superior. Una variable diferencial es la percepción visual que en los estudios analizados se mide en el tratamiento de los pacientes con ACV (48). Ningún estudio de los analizados incluyó evidencias sobre los beneficios del uso de la tecnología en la adherencia de los pacientes al proceso terapéutico. Este aspecto es fundamental dado que la tecnología contribuye a la innovación en la prestación de servicios de salud.

## Conclusiones

Durante los últimos años se han abierto líneas de investigación utilizando dispositivos mecánicos y tecnológicos que recrean condiciones para el aprendizaje motor y registran las variables fisiológicas y clínicas involucradas en el proceso terapéutico.

Estudios recientes han demostrado el potencial de la intervención con realidad virtual en beneficio de pacientes con alteraciones del movimiento debido a una disfunción neurológica (14,49). En el aprendizaje motor, la duración, la intensidad, la repetición, la variabilidad y la realimentación son claves para conseguir resultados significativos. Los estudios en neurociencia computacional han demostrado que la tecnología en realidad virtual ofrece una mayor realimentación con respecto a las características del movimiento, como por ejemplo la precisión, la velocidad, el desplazamiento, entre otros, lo cual ayuda a mejorar el aprendizaje motor y la ejecución de tareas en sujetos sanos, comparado con el entrenamiento tradicional.

Es importante diseñar protocolos de entrenamiento acordes con la condición clínica de cada usuario en ambientes seguros. Se requiere objetivar el proceso de rehabilitación para medir con precisión los cambios que producen estrategias de aprendizaje en las capacidades de movimiento de las personas con deficiencias del sistema neuromuscular. De esta manera, se puede generar evidencia del impacto que tienen los programas de entrenamiento motor, ya sea la convencional o la virtual para modificar la capacidad funcional y la calidad de vida de las personas.

Dadas las implicaciones en los procesos de aprendizaje motor y la diversidad de las capacidades que se activan para la adaptación corporal a los recursos tecnológicos disponibles, es importante continuar investigando el potencial de la aplicación de estas nuevas estrategias terapéuticas.

Los estudios coinciden en la importancia de identificar la relación dosis-respuesta en los programas de entrenamiento motor, dado que el nivel de cambio funcional está influenciado por la variabilidad de las estrategias y la parametrización que se puede generar en el continuo de la realidad a la virtualidad (54,55).

## Conflicto de intereses

Ninguno declarado por los autores.

## Financiación

Esta investigación contó con el apoyo financiero del programa de Fisioterapia de la Universidad del Rosario.

## Agradecimientos

A los estudiantes que hicieron parte del componente de profundización clínica en rehabilitación del programa de Fisioterapia de la Universidad del Rosario por su compromiso y actitud investigativa.

## Referencias

- World Health Organization. Neurological Disorders: Public Health Challenges. Ginebra: WHO; 2006.
- Arango GJ. Enfermedad de Parkinson en Colombia. Bogotá D.C.: Boletín Neuropilo No. 16; 2007.
- Instituto Nacional de Salud, Observatorio Nacional de Salud. Segundo informe ONS: mortalidad 1998-2011 y situación de salud en los municipios de frontera terrestre en Colombia. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia; 2013.
- Lederman E. Neuromuscular rehabilitation in manual and physical therapies: principles to practice. Edinburgh: Churchill Livingstone; 2010.
- Adamovich SV, Fluet GG, Tunik E, Merians AS. Sensorimotor training in virtual reality: A review. *Neurorehabilitation*. 2009;25(1):29-44. <http://doi.org/cgqg>.
- Dockx K, Bekkers EM, Van den Bergh V, Ginis P, Rochester L, Hausdorff JM, et al. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 2016;12:CD010760. <http://doi.org/f9jbmb>.
- dos Santos-Mendes FA, Pompeu JE, Modenesi-Lobo A, Guedes da Silva K, Oliveira T de P, Peterson-Zomignani A, et al. Motor learning, retention and transfer after virtual-reality-based training in Parkinson's disease--effect of motor and cognitive demands of games: a longitudinal, controlled clinical study. *Physiotherapy*. 2012;98(3):217-23. <http://doi.org/2r5>.
- Lohse KR, Hilderman CG, Cheung KL, Tatla S, Van der Loos HF. Virtual Reality Therapy for Adults Post-Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis Exploring Virtual Environments and Commercial Games in Therapy. *PLoS One*. 2014;9(3):e93318. <http://doi.org/cgqj>.
- Levin MF, Weiss PL, Keshner EA. Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation: incorporation of motor control and motor learning principles. *Phys Ther*. 2015;95(3):415-25. <http://doi.org/f64cwt>.
- Sheahan HR, Franklin DW, Wolpert DM. Motor planning, not execution, separates motor memories. *Neuron*. 2016;92(4):773-9. <http://doi.org/f9cw54>.
- Masiero S, Armani M, Rosati G. Upper-limb robot-assisted therapy in rehabilitation of acute stroke patients: focused review and results of new randomized controlled trial. *J Rehabil Res Dev*. 2011;48(4):355-66. <http://doi.org/dttcgv>.
- Colombo R, Sterpi I, Mazzone A, Delconte C, Pisano F. Robot-aided neurorehabilitation in sub-acute and chronic stroke: does spontaneous recovery have a limited impact on outcome? *NeuroRehabilitation*. 2013;33(4):621-9. <http://doi.org/cgqm>.
- Laffont I, Bakhti K, Coroian F, van Dokkum L, Mottet D, Schweighofer N, et al. Innovative technologies applied to sensorimotor rehabilitation after stroke. *Ann Phys Rehabil Med*. 2014;57(8):543-51. <http://doi.org/cgqn>.
- Adkins DL, Boychuk J, Remple MS, Kleim JA. Motor training induces experience-specific patterns of plasticity across motor cortex and spinal cord. *J Appl Physiol* (1985). 2006;101(6):1776-82. <http://doi.org/bqcpz>.
- Cho S, Ku J, Cho YK, Kim IY, Kang YJ, Jang DP, et al. Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients. *Comput Methods Programs Biomed*. 2014;113(1):258-65. <http://doi.org/f5ms2g>.
- Palacios-Navarro G, Albiol-Pérez S, García-Magariño García I. Effects of sensory cueing in virtual motor rehabilitation. A review. *J Biomed Inform*. 2016;60:49-57. <http://doi.org/f8622z>.
- Giphart JE, Chou YH, Kim DH, Bortnyk C, Wagenaar RC. Effects of Virtual Reality Immersion and Walking Speed on Coordination of Arm and Leg Movements. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. 2007;16(4):399-413. <http://doi.org/dfqj6r>.
- Pedraza-Hueso M, Martín-Calzón S, Díaz-Pernas FJ, Martínez-Zarzuela M. Rehabilitation Using Kinect-based Games and Virtual Reality. *Procedia Comput Sci*. 2015;75:161-8. <http://doi.org/cgqq>.
- Nocchi F, Gazzellini S, Grisolia C, Petrarca M, Cannata V, Cappa P, et al. Brain network involved in visual processing of movement stimuli used in upper limb robotic training: an fMRI study. *J Neuroeng Rehabil*. 2012;9:49. <http://doi.org/cgqr>.
- Kim D, Park J. Virtual reality based stroke rehabilitation. *J Korean Med Assoc*. 2013;56(1):16-22. <http://doi.org/ckpn>.
- Sigrist R, Rauter G, Marchal-Crespo L, Riener R, Wolf P. Sonification and haptic feedback in addition to visual feedback enhances complex motor task learning. *Exp Brain Res*. 2015;233(3):909-25. <http://doi.org/f62sdk>.
- Proffitt R, Lange B. Considerations in the efficacy and effectiveness of virtual reality interventions for stroke rehabilitation: moving the field forward. *Phys Ther*. 2015;95(3):441-8. <http://doi.org/f6328t>.
- Frazzitta G, Maestri R, Uccellini D, Bertotti G, Abelli P. Rehabilitation treatment of gait in patients with Parkinson's disease with freezing: a comparison between two physical therapy protocols using visual and auditory cues with or without treadmill training. *Mov Disord*. 2009;24(8):1139-43. <http://doi.org/b46hxx>.
- Peñasco-Martin B, de los Reyes-Guzman A, Gil-Agudo A, Bernal-Sa-hún A, Pérez-Aguilar B, de la Peña-Gonzalez AI. Aplicación de la realidad virtual en los aspectos motores de la neurorrehabilitación. *Rev Neurol*. 2010;51(8):481-8. ISSN: 02100010
- Hawkes CH, Del Tredici K, Braak H. A timeline for Parkinson's disease. *Parkinsonism Relat Disord*. 2010;16(2):79-84. <http://doi.org/cdw8ds>.
- Lees AJ, Hardy J, Revesz T. Parkinson's disease. *Lancet*. 2009;373(9680):2055-66. <http://doi.org/d3m8ev>.
- Serra-Olivares J, Sánchez-Pato A, Alonso-Roque JI. Valoración Motriz del Enfermo de Parkinson: Estudio de Revisión. *Rev Fisioter (Guadalupe)*. 2010;9(2):7-13.
- Allen NE, Sherrington C, Paul SS, Canning CG. Balance and Falls in Parkinson's Disease: A Meta-analysis of the Effect of Exercise and Motor Training. *Mov Disord*. 2011;26(9):1605-15. <http://doi.org/fcgvz>.
- Abbruzzese Giovanni, Marchese R, Avanzino L, Pelosin E. Rehabilitation for Parkinson's disease: Current outlook and future challenges. *Parkinsonism Relat Disord*. 2016;22(Suppl 1):S60-4 <http://doi.org/f728r8>.
- Ellis T, de Goede CJ, Feldman RG, Wolters EC, Kwakkel G, Wagenaar RC. Efficacy of a Physical Therapy Program in Patients With Parkinson's Disease: A Randomized Controlled Trial. *Arch Phys Med Rehabil*. 2005;86(4):626-32. <http://doi.org/dhmned>.
- van den Heuvel MR, van Wegen EE, de Goede CJ, Burgers-Bots IA, Beek PJ, Daffertshofer A, et al. The effects of augmented visual feedback during balance training in Parkinson's disease: study design of a randomized clinical trial. *BMC Neurol*. 2013;13:137. <http://doi.org/gbdzsw>.

32. Robles-Garcia V, Corral-Bergantinos Y, Espinosa N, Garcia-Sancho C, Sanmartin G, Flores J, *et al*. Effects of movement imitation training in Parkinson's disease: A virtual reality pilot study. *Parkinsonism Relat Disord*. 2016;26:17-23. <http://doi.org/cgqv>.
33. Petzinger GM, Fisher BE, McEwen S, Beeler JA, Walsh JP, Jakowec MW. Exercise-enhanced neuroplasticity targeting motor and cognitive circuitry in Parkinson's disease. *Lancet Neurol*. 2013;12(7):716-26. <http://doi.org/f2j97z>.
34. Doná F, Aquino CC, Gazzola JM, Borges V, Silva SM, Gananca FF, *et al*. Changes in postural control in patients with Parkinson's disease: a posturographic study. *Physiotherapy*. 2016;102(3):272-9. <http://doi.org/f83bnc>.
35. Pompeu JE, Arduini LA, Botelho AR, Fonseca MB, Pompeu SM, Torriani-Pasin C, *et al*. Feasibility, safety and outcomes of playing Kinect Adventures! for people with Parkinson's disease: a pilot study. *Physiotherapy*. 2014;100(2):162-8. <http://doi.org/f52qr5>.
36. Liao YY, Yang YR, Wu YR, Wang R. Virtual Reality-Based Wii Fit Training in Improving Muscle Strength, Sensory Integration Ability, and Walking Abilities in Patients With Parkinson's Disease: A Randomized Control Trial. *International Journal of Gerontology*. 2015;9(4): 190-5. <http://doi.org/cgqx>.
37. Yang WC, Wang HK, Wu RM, Lo CS, Lin KH. Home-based virtual reality balance training and conventional balance training in Parkinson's disease: A randomized controlled trial. *J Formos Med Assoc*. 2016;115(9):734-43. <http://doi.org/f87mvx>.
38. Liao YY, Yang YR, Cheng SJ, Wu YR, Fuh JL, Wang RY. Virtual Reality-Based Training to Improve Obstacle-Crossing Performance and Dynamic Balance in Patients With Parkinson's Disease. *Neurorehabil Neural Repair*. 2015;29(7):658-67. <http://doi.org/f7wtsx>.
39. Badarny S, Aharon-Peretz J, Susel Z, Habib G, Baram Y. Virtual reality feedback cues for improvement of gait in patients with Parkinson's disease. *Tremor Other Hyperkinet Mov (N Y)*. 2014;4:225. <http://doi.org/cgqz>.
40. Zhao Y, Heida T, van Wegen EE, Bloem BR, van Wezel RJ. E-health Support in People with Parkinson's Disease with Smart Glasses: A Survey of User Requirements and Expectations in the Netherlands. *J Parkinsons Dis*. 2015;5(2):369-78. <http://doi.org/f747k4>.
41. Tzallas AT, Tsiouras MG, Rigas G, Tsalikakis DG, Karvounis EC, Chondrogiorgi M, *et al*. PERFORM: a system for monitoring, assessment and management of patients with Parkinson's disease. *Sensors (Basel)*. 2014;14(11):21329-57. <http://doi.org/f6txnh>.
42. Nackaerts E, Heremans E, Vervoort G, Smits-Engelsman B, Swinnen S, Vandenberghe W, *et al*. Relearning of Writing Skills in Parkinson's Disease After Intensive Amplitude Training. *Mov Disord*. 2016;31(8):1209-16. <http://doi.org/cgq2>.
43. Yen CY, Lin KH, Hu MH, Wu RM, Lu TW, Lin CH. Effects of Virtual Reality-Augmented Balance Training on Sensory Organization and Attentional Demand for Postural Control in People With Parkinson Disease: A Randomized Controlled Trial. *Physical Therapy*. 2011;91(6): 862-74. <http://doi.org/b7m76m>.
44. Matar E, Shine JM, Naismith SL, Lewis SJ. Virtual reality walking and dopamine: opening new doorways to understanding freezing of gait in Parkinson's disease. *J Neurol Sci*. 2014;344(1-2):182-5. <http://doi.org/f2tm3t>.
45. You SH, Jang SH, Kim YH, Hallett M, Ahn SH, Kwon YH, *et al*. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study. *Stroke*. 2005;36(6):1166-71. <http://doi.org/dwphn9>.
46. Jung J, Yu J, Kang H. Effects of virtual-reality treadmill training on balance and balance self efficacy in stroke patients with a history of falling. *J Phys Ther Sci*. 2012;24(11):1133-6. <http://doi.org/cgq3>.
47. Shin JH, Ryu H, Jang SH. A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: a usability test and two clinical experiments. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:32. <http://doi.org/f5xnnx>.
48. Jo K, Yu J, Jung J. Effects of Virtual Reality-Based Rehabilitation on Upper Extremity Function and Visual Perception in Stroke Patients: a Randomized Control Trial. *J Phys Ther Sci*. 2011;24(11):1205-8. <http://doi.org/cgq4>.
49. Lin CY, Tsai CM, Shih PC, Wu HC. Development of a novel haptic glove for improving finger dexterity in poststroke rehabilitation. *Technol Health Care*. 2015;24(Suppl 1):S97-103. <http://doi.org/cgq5>.
50. Kiper P, Piron L, Turolla A, Stozek J, Tonin P. The effectiveness of reinforced feedback in virtual environment in the first 12 months after stroke. *Neurol Neurochir Pol*. 2011;45(5):436-44. <http://doi.org/cgq6>.
51. Piron L, Turolla A, Agostini M, Zucconi C, Ventura L, Dam M. Motor Learning Principles for Rehabilitation: A Pilot Randomized Controlled Study in Poststroke Patients. *Neurorehabil Neural Repair*. 2010;24(6):501-8. <http://doi.org/btcctb>.
52. Kim JH, Jang SH, Kim CS, Jung JH, You JH. Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: a double-blind, randomized controlled study. *Am J Phys Med Rehabil*. 2009;88(9):693-701. <http://doi.org/ffcdx9>.
53. Bates T, Kho L, Boudville A, Lee K, Silbert P, Blacker D, *et al*. Sorcan Iscore can be a useful quality measure of the effectiveness and safety of RTPA in a new small stroke unit. *Int J Stroke*. 2014;9:256.
54. Duchesne C, Lungu O, Nadeau A, Robillard ME, Boré A, Bobeuf F, *et al*. Enhancing both motor and cognitive functioning in Parkinson's disease: Aerobic exercise as a rehabilitative intervention. *Brain Cogn*. 2015;99:68-77. <http://doi.org/f7qm22>.
55. Luque-Moreno C, Ferragut-Garcías A, Rodríguez-Blanco C, Here-dia-Rizo AM, Oliva-Pascual-Vaca J, Kiper P, *et al*. A Decade of Progress Using Virtual Reality for Poststroke Lower Extremity Rehabilitation. *Biomed Res Int*. 2015;342529. <http://doi.org/gb5xfs>.