

ORIGINAL

BioTrak: análisis de efectividad y satisfacción de un sistema de realidad virtual para la rehabilitación del equilibrio en pacientes con daño cerebral

R. Lloréns^a, C. Colomer-Font^b, M. Alcañiz^{a,c} y E. Noé-Sebastián^{c,*}

^a Instituto Interuniversitario de Investigación en Bioingeniería y Tecnología Orientada al Ser Humano, Universitat Politècnica de València, Valencia, España

^b CIBER de Fisiopatología, Obesidad y Nutrición, CB06/03, Instituto de Salud Carlos III, Universitat de Jaume I, Castellón, España

^c Servicio de NeuroRehabilitación, Hospital NISA Valencia al Mar y NISA Sevilla Aljarafe, Fundación Hospitales NISA

Recibido el 3 de noviembre de 2011; aceptado el 27 de abril de 2012

Accesible en línea el 22 de junio de 2012

PALABRAS CLAVE

Daño cerebral;
Equilibrio;
Ictus;
Realidad virtual;
Rehabilitación;
Usabilidad

Resumen

Objetivo: Estudio de efectividad y satisfacción de un sistema de realidad virtual (BioTrak) para la rehabilitación del equilibrio en pacientes con daño cerebral adquirido (DCA).

Material y métodos: Diez pacientes con una hemiparesia crónica (> 6 meses) como secuela de un DCA participaron en un programa de 20 sesiones con el módulo de equilibrio mediante alcances del sistema BioTrak. Todos los pacientes fueron valorados al inicio, al final del tratamiento y un mes después de finalizar el mismo con la *Berg Balance Scale* (BBS) y la *Tinetti Performance-Oriented Mobility Assessment* (POMA), así como mediante la posturografía dinámico-métrica computarizada NedSVE/IBV. El estudio posturográfico incluyó el análisis de índices sensoriales, del desplazamiento rítmico del peso, así como de los límites de estabilidad. El estudio de usabilidad se realizó mediante un cuestionario elaborado ad hoc.

Resultados: Un ANOVA de medidas repetidas mostró una mejora significativa en BBS ($p < 0,01$), POMA ($p < 0,01$), índice vestibular ($p < 0,05$), control rítmico antero-posterior ($p < 0,05$) y una tendencia a la significación en el control medio-lateral ($p = 0,059$). El análisis post hoc reveló mejoras significativas entre la valoración inicial y final en la BBS, la POMA y en control antero-posterior, que se mantuvieron al mes de completar el tratamiento. El sistema mostró un alto grado de usabilidad, tanto en aspectos positivos (presencia, inmersión, facilidad de uso) como por la ausencia de efectos adversos.

Conclusión: Nuestros resultados confirman la validez de los sistemas de realidad virtual para la rehabilitación del equilibrio en esta población. Las características de usabilidad del sistema BioTrak permite la generalización del sistema a un alto número de pacientes y entornos.

© 2011 Sociedad Española de Neurología. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: enoe@comv.es (E. Noé-Sebastián).

KEYWORDS

Brain injury;
Balance;
Stroke;
Virtual reality;
Rehabilitation;
Usability

BioTrak virtual reality system: effectiveness and satisfaction analysis for balance rehabilitation in patients with brain injury**Abstract**

Objective: To study effectiveness of and satisfaction with a virtual reality-based balance rehabilitation system (BioTrak) for patients with acquired brain injury (ABI).

Material and methods: Ten patients with chronic hemiparesis (chronicity > 6 months) following an ABI completed a 20-session programme using the balance reaching-task module of the BioTrak system. All patients were assessed at baseline, at the end of treatment, and one month later with the Berg Balance Scale (BBS), the Tinetti Performance-Oriented Mobility Assessment (POMA), and the computerised posturography tool NedSVE/IBV. The posturography study included analysis of sensory indexes, limits of stability, and rhythmic weight shift. The usability study was conducted using an ad hoc questionnaire.

Results: Repeated measures ANOVA showed a significant improvement in BBS ($P < .01$), TBS ($P < .01$), vestibular index ($P < .05$), and anterior-posterior weight shift ($P < .05$); a trend in the same direction was also found for medial lateral weight shift ($P = .059$). The post-hoc analysis revealed significant improvement between the initial and final assessments for BBS, POMA and anterior-posterior weight shift control; gains remained a month after completing the programme. The system showed a high degree of usability in terms of presence, immersion and user-friendliness, and there was a significant absence of adverse effects.

Conclusion: Our results confirm the utility of virtual reality systems for balance rehabilitation in this population. Usability data suggest that BioTrak could be adapted for use in multiple rehabilitation settings by a high number of patients.

© 2011 Sociedad Española de Neurología. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

La gestión del equilibrio requiere del procesamiento simultáneo y continuo de las aportaciones de múltiples sistemas, incluyendo la información sensorial (visual, vestibular y propioceptiva), la integración cognitiva (atención y funciones ejecutivas fundamentalmente), la función del cerebelo y, obviamente, la retroalimentación del sistema sensitivo-motor¹. Este complejo mecanismo hace que la inestabilidad postural sea un signo común en pacientes que han sufrido un daño cerebral adquirido (DCA), ya que a esta patología se asocian con frecuencia disfunciones que afectan al sistema nervioso central y periférico, a los órganos perceptivos y/o al sistema musculoesquelético, entre otros². Además de ser un problema de alta prevalencia, las alteraciones del equilibrio y del control postural son una causa frecuente de caídas y un factor limitante de autonomía e independencia en las actividades de la vida diaria (AVD)^{3,4}, por lo que su recuperación es uno de los objetivos prioritarios en la rehabilitación motora de los pacientes DCA.

Los conocimientos actuales sobre las capacidades plásticas de nuestro cerebro, en condiciones de salud y enfermedad, han revolucionado en estos últimos años la forma de afrontar la recuperación de los déficits resultantes tras un DCA. Hoy en día, existe un acuerdo unánime en aceptar que la recuperación —y no solo la recuperación motora— tras una lesión cerebral se alcanza más eficazmente a través de una intervención temprana, intensiva y orientada a la tarea que se desea recuperar⁵. Además, sabemos que los resultados son aún más beneficiosos, en términos de funcionalidad, si a este entrenamiento se le enriquece con un feedback sensorial específico⁶. Este enfoque tan simple y a la vez tan revolucionario ha sido rápidamente asimilado por las nuevas tecnologías, especialmente por aquellos

sistemas que permiten generar programas de rehabilitación fieles a los principios de plasticidad cerebral (repetición y especificidad en un entorno ecológico, rico y motivante). Los sistemas de realidad virtual son un buen ejemplo de ello, por lo que han comenzado a expandirse dentro del ámbito de la neurorrehabilitación ofreciendo resultados claramente beneficiosos^{7–10}.

En las últimas décadas ha habido un creciente interés en el desarrollo de sistemas de rehabilitación virtual motora aplicados a diferentes patologías de origen cerebral. Existen numerosos estudios sobre sistemas virtuales diseñados específicamente para la rehabilitación de la extremidad superior^{11,12}, siendo menos frecuentes los que demuestran la eficacia clínica de estos programas en la rehabilitación de otras funciones como el equilibrio o la marcha en pacientes hemiparéticos^{13–15}.

En el ámbito de la rehabilitación virtual del control postural y del equilibrio se han desarrollado diversos programas que recrean entornos virtuales mediante gráficos bidimensionales¹⁶ y tridimensionales^{17,18}, empleando para ello diversos dispositivos: sistemas hápticos¹⁹, dispositivos integrales de cabeza²⁰ y los sistemas CAVE²¹, entre otros. Más recientemente, otras líneas de trabajo, en las que nuestro grupo de trabajo ha participado, han optado por dotar de contenidos clínicos a herramientas que emplean el control postural como actividad lúdica haciendo uso de videoconsolas comerciales^{22,23}. Pese a la diversidad de dispositivos desarrollados, las dificultades de instalación en los entornos clínicos, la repercusión en términos de seguridad para el paciente que conlleva el entrenamiento de una función como el control postural o las dificultades de usabilidad específicas al entrenamiento del equilibrio son algunas de las razones por las que la mayoría de servicios de neurorrehabilitación siguen optando por el entrenamiento convencional

o, como mucho, por el uso de programas de rehabilitación acoplados a sistemas posturográficos²⁴⁻²⁶.

Desde el punto de vista terapéutico, existe todavía una gran necesidad de sistemas de rehabilitación virtual que puedan instalarse fácilmente en el entorno clínico y que cuenten con la suficiente flexibilidad y especificidad de contenidos para abarcar los diferentes estadios clínicos de las patologías subyacentes al DCA. BioTrak es un sistema de RV compuesto por 3 módulos específicamente diseñados para la rehabilitación motora, cognitiva y psicosocial de pacientes con lesiones neurológicas diversas. En el módulo de rehabilitación motora del equilibrio, BioTrak ofrece 2 enfoques terapéuticos distintos, incluyendo alcances dinámicos y transferencias de peso sobre una plataforma de presiones. Concretamente, este estudio describe los datos de eficacia y satisfacción de los ejercicios de equilibrio en bipedestación mediante alcances en pacientes con DCA.

Material y métodos

Participantes

Un total de 120 pacientes con DCA, evaluados entre enero y julio del 2011 en un servicio especializado en el tratamiento de esta patología, fueron candidatos a participar en este estudio según los criterios expuestos a continuación. Todos los pacientes incluidos debían presentar una hemiparesia debido a un DCA, encontrarse estables clínicamente, haber transcurrido un mínimo de 6 meses desde la lesión inicial, presentar un adecuado nivel cognitivo (puntuación en el *Mini Mental State Examination* ≥ 24)²⁷, un grado de espasticidad menor de 3 según la *Asworth Scale*²⁸ y ser capaces de realizar transferencias dinámicas en bipedestación, tal y como se especifica en la *Brunel Balance Assessment* (BBA) (sección 3, nivel 9)²⁹. Como criterios de exclusión, se determinó la presencia de: a) síndrome de negligencia unilateral; b) ataxia y/u otros síntomas cerebelosos; c) problemas visuales severos que dificultasen la interacción con el sistema, y d) déficit de comprensión que interfiriese en la correcta ejecución de los ejercicios. Las características sociodemográficas y clínicas de la muestra se detallan en la tabla 1.

Protocolo experimental

Dispositivo

El dispositivo está formado por un ordenador de sobremesa, una pantalla panorámica de 47" y un sistema de tracking o seguimiento (óptico, electromagnético o mediante sensores de profundidad, como el que utiliza el dispositivo Kinect^{TM21}) que permite la interacción del usuario con el entorno virtual. El sistema seguimiento óptico, que fue el aquí empleado, consta de 3 cámaras que detectan la posición del usuario a través de unas marcas reflectantes colocadas en partes específicas de su cuerpo (tobillos, muñecas, hombros o cabeza en función de la tarea a realizar) y la transfieren al escenario virtual. Además, BioTrak cuenta con un módulo de gestión de pacientes que permite al terapeuta registrar nuevos usuarios, configurar sesiones de trabajo específicas para cada uno

Tabla 1 Características sociodemográficas de la muestra

| | |
|---|---------|
| Sexo | |
| Varones n (%) | 8 (80%) |
| Mujeres n (%) | 2 (20%) |
| Edad, años (media \pm DE) | |
| 41,6 \pm 15 | |
| Cronicidad, días (media \pm DE) | |
| 240,5 \pm 76,3 | |
| Etiología | |
| Ictus, n (%) | 7 (70%) |
| TCE, n (%) | 3 (30%) |
| Hemiparesia | |
| Derecho n (%) | 6 (60%) |
| Izquierda n (%) | 4 (40%) |

de ellos y comprobar su evolución a través de los resultados obtenidos.

El módulo de rehabilitación del equilibrio mediante alcances de BioTrak sumerge al paciente en un escenario virtual 3D donde debe realizar una serie de movimientos para alcanzar los ítems que van apareciendo a su alrededor. El ejercicio usa una vista en tercera persona, lo que permite al usuario identificar de forma precisa su posición y los movimientos que está realizando. Con el fin de facilitar la comprensión de la tarea y la sensación de presencia en el mundo virtual, el entorno y el avatar son simples y fáciles de seguir, incluso por pacientes que puedan presentar problemas cognitivos subyacentes. Este módulo está formado por diferentes ejercicios de dificultad creciente que se pueden llevar a cabo en 2 posiciones: sedestación (figs. 1-3) y bipedestación (fig. 4). Los ejercicios de sedestación se emplean para el entrenamiento del control cefálico y de tronco, mientras que los de bipedestación mejoran el equilibrio estático y dinámico, así como el control postural y las transferencias. Todos los ejercicios están diseñados siguiendo los principios de aprendizaje motor: son repetitivos, intensivos, motivadores, graduables en dificultad y orientados a una tarea específica.

El software del sistema permite que las sesiones de entrenamiento puedan definirse de forma específica para cada usuario seleccionando diferentes ejercicios y configurando su duración, así como el tiempo de descanso y el número de repeticiones. Asimismo, la dificultad de cada uno de los

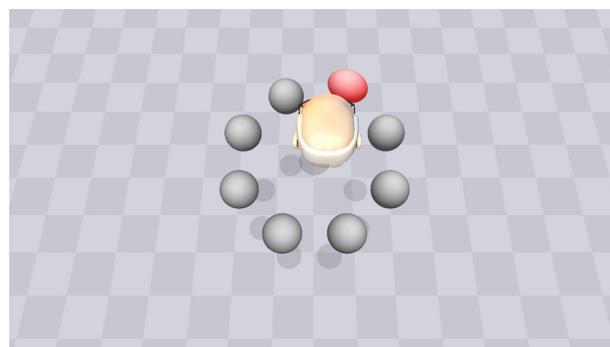


Figura 1 Ejercicio en sedestación: alcances mediante cabeza.

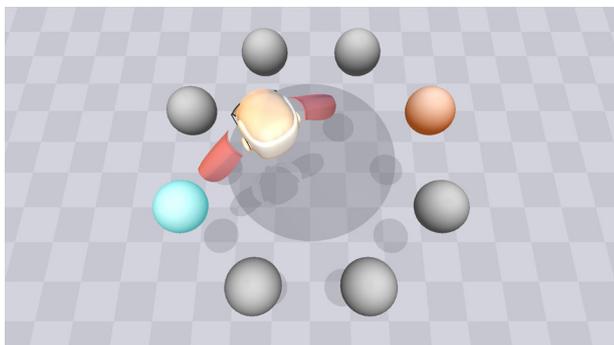


Figura 2 Ejercicio en sedestación: alcances mediante hombros.

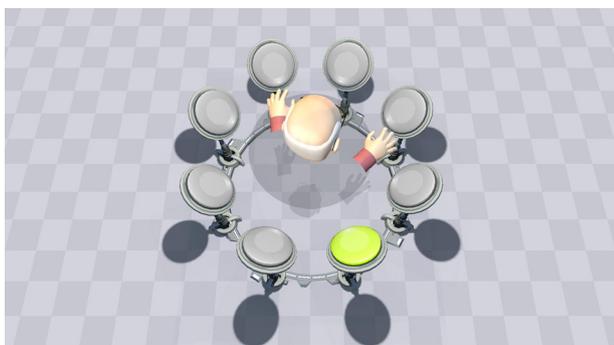


Figura 3 Ejercicio en sedestación: alcances mediante manos.

ejercicios puede graduarse a través de una serie de parámetros, como son la distancia a la que aparecen los ítems, el tiempo que permanecen visibles, su tamaño, su localización espacial respecto al sujeto, así como el número de ítems simultáneos que aparecen en el entorno. Para facilitar y agilizar la tarea diaria el terapeuta puede, en caso necesario, hacer uso de una serie de niveles de dificultad predefinidos por el sistema y autogestionable.

Protocolo de intervención

Todos los pacientes incluidos en el presente estudio recibieron entre 3 y 5 sesiones semanales de 1 h de duración en las que combinaban fisioterapia convencional y entrenamiento con BioTrak. El protocolo de tratamiento con BioTrak consistió en un total de 20 sesiones de 20 min de duración. Cada

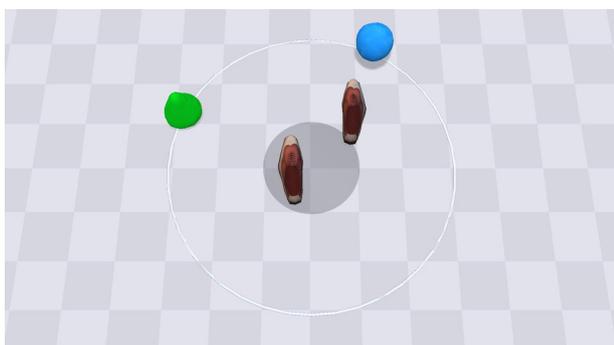


Figura 4 Ejercicio en bipedestación: alcances mediante pies.

una de las sesiones constaba de 3 ejercicios de 6 min, más 2 min de descanso intercalados.

Las sesiones se realizaron en una parte acondicionada del gimnasio, bajo la supervisión del fisioterapeuta responsable. El primer día de tratamiento todos los pacientes incluidos recibieron una explicación sobre la dinámica de los ejercicios, visualizaron una demostración de los mismos y realizaron una sesión de entrenamiento para familiarizarse con el uso del dispositivo. En la sesión inicial, los participantes comenzaron en el nivel más básico de dificultad que permitía el sistema y a partir de las siguientes sesiones se aumentó el nivel de dificultad en función de los resultados obtenidos, bien por el terapeuta o bien por el propio sistema, que aumenta de manera automática el nivel de dificultad cada vez que el paciente consigue finalizar el ejercicio con un porcentaje de errores $\leq 2\%$.

Protocolo de valoración

Todos los pacientes fueron valorados con el protocolo de valoración expuesto a continuación en el momento inicial (Vi), al finalizar el programa con BioTrak (Vf) y un mes después de haber finalizado el mismo (Vf + 1 m), período durante el cual los pacientes continuaron tratamiento con fisioterapia convencional.

El protocolo de evaluación para el módulo de equilibrio en bipedestación mediante alcances de BioTrak incluía como escalas clínicas la *Berg Balance Scale* (BBS)³⁰ y el *Tinetti Performance-Oriented Mobility Assessment* (POMA)³¹, que valoran el equilibrio estático y dinámico mientras se realizan diversos movimientos funcionales. Así mismo, todos los pacientes fueron evaluados mediante la plataforma dinamométrica NEDSVE/IBV³². Esta aplicación combina pruebas de valoración de posturografía estática con pruebas dinámicas, proporcionando un índice global sobre la valoración del equilibrio de un paciente. El equipo de medida utilizado es una plataforma dinamométrica con 4 captadores extensométricos, que permite analizar las fuerzas de acción-reacción que se ejercen sobre ella, transformándolas en señales eléctricas. El sistema permite cuantificar los límites de estabilidad del paciente y ofrece 3 índices sensoriales (visual, propioceptivo y vestibular), que aportan información de la implicación de cada uno de estos sistemas en el equilibrio del sujeto. Además, la posturografía registra una variable correspondiente al desplazamiento rítmico del peso, que cuantifica la habilidad del paciente para desplazar su centro de gravedad lateralmente (control medio-lateral) y de delante a atrás (control antero-posterior). Todos los índices del sistema se muestran en porcentaje (%), de forma que resultados distintos del 100% reflejan discrepancias respecto de los valores de normalidad obtenidos por un grupo normativo ajustado a la edad y altura del paciente. De acuerdo con las especificaciones del sistema, se permite una discrepancia del 5% respecto de los valores del grupo normativo como valor límite de la normalidad para los índices sensoriales y del 15% para los límites de estabilidad y el control rítmico y direccional, de forma que cuanto menor sea el valor de los distintos índices obtenidos mayor será el grado de afectación. En todos los casos, el estudio del equilibrio se realizó sin ningún tipo de ayuda.

Tabla 2 Evolución (ANOVA de medidas repetidas con Bonferroni) de las variables clínicas y posturográficas al inicio, fin y al mes de finalizar el entrenamiento con BioTrak

| | Vi | Vf | Vf + 1 m | p |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|
| Berg Balance Scale | 46,2 ± 4,7 | 50,4 ± 3,6 | 51,9 ± 3,9 | < 0,01 ^{a,b*} |
| Tinetti POMA | 23,2 ± 3,8 | 26,4 ± 1,4 | 27,2 ± 1,1 | < 0,01 ^{a,b*} |
| Límites de estabilidad (NED/Sve) | 79,3 ± 10 | 81,2 ± 9,4 | 80,5 ± 9,4 | NS |
| Control medio-lateral (NED/Sve) | 84,9 ± 14,2 | 90,80 ± 8,8 | 91,5 ± 8,5 | 0,059 |
| Control antero-posterior (NED/Sve) | 81,1 ± 10,8 | 87,50 ± 7,2 | 88,6 ± 0,1 | < 0,05 ^{a,b*} |
| Índice vestibular (NED/Sve) | 50,2 ± 44,4 | 79,9 ± 29,9 | 79,4 ± 30,4 | < 0,05 ^{a,b*} |
| Índice somático (NED/Sve) | 96,0 ± 3,5 | 97,6 ± 2,2 | 97,7 ± 2 | NS |
| Índice visual (NED/Sve) | 97,8 ± 2,2 | 97,7 ± 2,75 | 97,8 ± 2,2 | NS |

NS: no significativo; Vi: valoración inicial; Vf: valoración final; Vf + 1 m: valoración al mes de finalizar el tratamiento.

^a: Vi < Vf; ^b: Vi < Vf+1 m. *p < 0,05. **p < 0,01.

Los datos corresponden a la media ± desviación estándar.

Para comprobar las respuestas subjetivas de los pacientes a la experiencia virtual, todos los pacientes completaron al finalizar el protocolo de tratamiento un cuestionario de usabilidad compuesto por 8 preguntas, con un rango de puntuación de 1-5. Dicho cuestionario fue elaborado ad hoc siguiendo el modelo del *Short Feedback Questionnaire* (SFQ)³³ y adaptado a las características del sistema. Las primeras 6 preguntas del cuestionario hacían referencia al grado de diversión, a la sensación de sentirse parte del entorno (presencia), a la percepción del entorno como real (inmersión), a la percepción del éxito (feedback) y del control de la situación, y a la comprensión global del feedback generado por el sistema. La séptima pregunta exploraba el grado de confort durante la experiencia virtual, así como los posibles efectos adversos (mareo, desorientación, molestias oculares, etc.). La octava pregunta analizaba la percepción de dificultad durante la ejecución de la tarea así como con el manejo del hardware. Las puntuaciones de cada pregunta se ajustaron de manera que a mayor puntuación total mayor grado de usabilidad del sistema y menores efectos adversos.

Análisis estadístico

Se empleó estadística descriptiva (medias ± DE) para las variables cuantitativas y descriptivos de frecuencia para las medidas cualitativas. Para comprobar si existían diferencias significativas en las variables que se debían estudiar en los 3 momentos de valoración (Vi, Vf y Vf + 1) se empleó un ANOVA de medidas repetidas (efecto tiempo) con un análisis post hoc (Bonferroni) para las comparaciones en los 3 momentos. Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo empleando el programa SPSS para Mac, versión 15 (SPSS Inc., Chicago, EE. UU.).

Resultados

Análisis longitudinal

En la **tabla 2** se muestran las medias ± desviaciones estándar de las escalas motoras (BBS y POMA) y de los parámetros extraídos de la posturografía dinámica correspondientes a la Vi, la Vf y la Vf + 1 m. Una ANOVA de medidas repetidas

analizando el efecto tiempo mostró una mejora significativa de las puntuaciones para la BBS (p < 0,01) y la POMA (p < 0,01). Así mismo, en los parámetros extraídos del análisis posturográfico se observaron mejoras significativas en el índice vestibular (p < 0,05), en el control antero-posterior (p < 0,05) y una tendencia a la significación en el control medio-lateral (p = 0,059). El análisis post hoc reveló mejoras significativas entre la Vi y la Vf en la BBS, la POMA y en control antero-posterior, que se mantuvieron al mes de completar el protocolo con BioTrak. No se observaron mejoras estadísticamente significativas en ninguna de las variables a estudio al comparar las puntuaciones obtenidas entre la Vf y la Vf + 1 m.

Clínicamente, 3 de los 4 pacientes que al inicio del tratamiento precisaban una ayuda técnica (bastón cuadrúpole) para marcha segura por interiores consiguieron marcha sin ayudas.

Usabilidad

De acuerdo con las puntuaciones obtenidas en el cuestionario de usabilidad, los pacientes describieron la experiencia como agradable (3,7 ± 0,9), sintieron un elevado nivel de presencia durante la experiencia virtual (4,1 ± 0,8) y percibieron el entorno como realista (3,7 ± 1,1). Así mismo, los participantes mostraron una adecuada comprensión del feedback aportado por el sistema (4,4 ± 0,9) y un buen control de la situación (3,63 ± 0,84). En general, describieron su ejecución como exitosa (3,7 ± 0,8), y no percibieron grandes dificultades para llevar a cabo la tarea (3,5 ± 1) o en el uso del dispositivo (4 ± 1). Ninguno de los participantes describió efectos adversos (molestias en los ojos, mareos, náuseas, etc.) durante la realización de la tarea virtual.

Discusión

De acuerdo con nuestros resultados, BioTrak es una herramienta eficaz y de adecuada usabilidad en la rehabilitación del equilibrio en pacientes con DCA. La utilidad clínica del sistema está avalada por la mejora que los pacientes incluidos en el módulo de rehabilitación del equilibrio mediante alcances mostraron en las escalas motoras a estudio. Así

mismo, el estudio posturográfico mostró mejoras en los mecanismos dinámicos de control postural, así como en el componente vestibular encargado de mantener el equilibrio. Además, manteniendo un programa de rehabilitación tradicional, las mejorías observadas al finalizar el tratamiento parecen perdurar en el tiempo.

Las alteraciones del equilibrio y del control postural son uno de los déficits más comunes y más limitantes funcionalmente tras un DCA³⁴. Característicamente, estos problemas pueden persistir durante años y alterar significativamente la calidad de vida del paciente⁴. Aunque en estos últimos años empezamos a disponer de diferentes programas de RV centrados en la recuperación de habilidades motoras perdidas tras una lesión cerebral, hasta la fecha existen escasos estudios que hayan demostrado la efectividad de estos programas en la rehabilitación del equilibrio^{13-15,17}. Además, los resultados obtenidos por estos sistemas son difícilmente generalizables debido al pequeño tamaño de las muestras o a limitaciones del diseño experimental de los estudios. De la misma manera, los resultados expuestos en este estudio deben tenerse en cuenta considerando las características específicas de nuestra muestra y al hecho de la ausencia de un grupo control. Aun así, las mejoras experimentadas tras el tratamiento con BioTrak y la estabilización de esas puntuaciones un mes después de concluir el mismo confirman la ventaja del entrenamiento con este tipo de sistemas. La relevancia clínica de estos resultados es aún mayor si tenemos en cuenta la cronicidad de nuestra muestra. De hecho, la mejoría media obtenida tanto en la BBS como en la POMA son ligeramente inferiores a los cambios mínimos detectables publicados para estas escalas en poblaciones con patología neurológica en fase más aguda o en muestras de sujetos sanos³⁵⁻³⁷.

En consonancia con la mejoría clínica, el entrenamiento con BioTrak también mostró una clara mejoría en las puntuaciones obtenidas a través del análisis posturográfico. El análisis inicial mostró el patrón clásico descrito en pacientes hemiparéticos con una clara reducción de los límites de estabilidad de predominio en el hemicuerpo parético, una reducción de la información proporcionada por las aferencias vestibulares a expensas de un creciente peso sobre las aferencias visuales, así como una reducción global en las pruebas de control rítmico y direccional^{38,39}. Característicamente, BioTrak fue capaz de mejorar el índice vestibular y las pruebas de control rítmico, alcanzando estas últimas el rango inferior de la normalidad. La ausencia de mejoría detectable en los límites de estabilidad podría estar relacionada con la especificidad de la tarea entrenada y su semejanza con los ejercicios de control rítmico frente a los ejercicios de desplazamiento de peso sin alcances.

El sustrato neurofisiológico que sustenta la mejoría clínica observada con algunas de estas intervenciones y, en concreto, los cambios plásticos que estos programas potencian en el cerebro de pacientes que han sufrido una lesión adquirida, apenas han sido estudiados. Recientemente, se ha reportado una reorganización del córtex sensitivo-motor en sintonía con la mejoría clínica observada en la muestra sometida a estudio tras un programa de rehabilitación virtual motora en pacientes con ictus⁴⁰. Las recientes investigaciones sobre la recuperación motora en lesiones cerebrales coinciden en señalar la importancia de una serie de principios básicos de aprendizaje que garanticen la

máxima eficacia terapéutica de cualquier técnica⁵. BioTrak cumple con estos principios básicos de aprendizaje motor, permitiendo una intervención temprana, intensiva y personalizable. Dado que numerosos estudios señalan la ventaja funcional de un entrenamiento motor orientado a la tarea específica^{41,42}, en la actualidad se está dotando al sistema BioTrak de un entorno ecológico, donde el paciente realice tareas semejantes a las que se enfrenta en su día a día, favoreciendo la generalización de las ganancias a sus actividades cotidianas.

BioTrak combina los beneficios de otros sistemas de entrenamiento del equilibrio basados en el uso de nuevas tecnologías, como los sistemas de posturografía con feedback⁴³ o el empleo de estrategias basadas en entornos virtuales aplicados a videoconsolas, como la *Wii Balance Board*, entre otros^{22,23}. BioTrak presenta como ventajas añadidas su versatilidad y la especificidad de su diseño y contenido. En este sentido, BioTrak abarca el espectro completo de la rehabilitación del equilibrio, desde las fases iniciales de recuperación, donde se trabaja el control cefálico y de tronco en sedestación, hasta fases más avanzadas donde se entrena el equilibrio dinámico en bipedestación incluyendo el manejo de varios ítems simultáneos. BioTrak permite al terapeuta planificar sesiones personalizadas para cada paciente (nivel de intensidad y dificultad, tipo de tarea, tiempo de descanso y de trabajo, etc.), ajustando el programa terapéutico a sus necesidades y capacidades en cada una de las fases de la rehabilitación. Su diseño específico, a diferencia del uso de sistemas de entretenimiento con software no clínico (videojuegos comerciales), permite además una fácil interacción paciente-sistema-terapeuta. Como ventaja añadida, de acuerdo con los resultados del estudio de usabilidad, BioTrak resulta una actividad altamente motivante. Ninguno de los sujetos de nuestro estudio refirió efectos adversos y todos coincidieron en señalar a BioTrak como una herramienta que fomenta la participación activa del sujeto en el proceso de recuperación. Además, frente a otros sistemas más complejos, BioTrak es una herramienta de bajo coste, fácilmente integrable en cualquier entorno clínico, gracias a su versatilidad en el sistema de tracking, y con un nivel de presencia e inmersión comparable al de otros dispositivos mucho más invasivos.

Para futuras líneas de investigación sería recomendable ampliar el tamaño muestral así como incluir un grupo control que nos permita comprobar su eficacia comparándolo con un entrenamiento convencional. Clínicamente, nuestros resultados aportan evidencia sobre los beneficios obtenidos por pacientes con problemas de equilibrio debidos a un DCA tras un entrenamiento intensivo de un mes de duración con BioTrak. Se trata de una herramienta robusta, de bajo coste y probada validez y utilidad clínica, que cumple con los principios de aprendizaje motor y que abarca el espectro completo de rehabilitación del equilibrio en los pacientes con DCA.

Financiación

Este estudio fue financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (proyecto TEREHA, IDI-20110844) y parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, proyecto *Game Teen* (TIN2010-20187), proyectos Consolider-C (SEJ2006-14301/PSIC), «CIBER de

Fisiopatología de la Obesidad y Nutrición, una iniciativa del ISCIII», el Programa de Excelencia PROMETEO (Generalitat Valenciana, Conselleria de Educación, 2008-157).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Ng SS. Contribution of subjective balance confidence on functional mobility in subjects with chronic stroke. *Disabil Rehabil.* 2011.
- Perennou D, Decavel P, Manckoundia P, Penven Y, Mourey F, Launay F, et al. Evaluation of balance in neurologic and geriatric disorders. *Ann Readapt Med Phys.* 2005;48:317–35.
- Schmid AA, Van Puymbroeck M, Knies K, Spangler-Morris C, Watts K, Damush T, et al. Fear of falling among people who have sustained a stroke: a 6-month longitudinal pilot study. *Am J Occup Ther.* 2011;65:125–32.
- Tyson SF, Hanley M, Chillala J, Selley AB, Tallis RC. The relationship between balance, disability, and recovery after stroke: predictive validity of the Brunel Balance Assessment. *Neurorehabil Neural Repair.* 2007;21:341–6.
- Moucha R, Kilgard MP. Cortical plasticity and rehabilitation. *Prog Brain Res.* 2006;157:111–22.
- Albiol S, Gil-Gomez JA, Alcaniz M. Influence of tracking feedback in user motor response in rehabilitation therapy. *Stud Health Technol Inform.* 2011;154:34–8.
- Burdea GC. Virtual rehabilitation -benefits and challenges. *Methods Inf Med.* 2003;42:519–23.
- Holden MK. Virtual environments for motor rehabilitation: review. *Cyberpsychol Behav.* 2005;8:187–211, discussion 212-9.
- Penasco-Martin B, de los Reyes-Guzman A, Gil-Agudo A, Bernal-Sahun A, Perez-Aguilar B, de la Pena-Gonzalez AI. Application of virtual reality in the motor aspects of neurorehabilitation. *Rev Neurol.* 2010;51:481–8.
- Sveistrup H. Motor rehabilitation using virtual reality. *J Neuroeng Rehabil.* 2004;1:10.
- Cameirao MS, Badia SB, Oller ED, Verschure PF. Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation. *J Neuroeng Rehabil.* 2010;7:48.
- Holden MK, Dyar TA, Dayan-Cimadoro L. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2007;15:36–42.
- Bisson E, Contant B, Sveistrup H, Lajoie Y. Functional balance and dual-task reaction times in older adults are improved by virtual reality and biofeedback training. *Cyberpsychol Behav.* 2007;10:16–23.
- Nyberg L, Lundin-Olsson L, Sondell B, Backman A, Holmlund K, Eriksson S, et al. Using a virtual reality system to study balance and walking in a virtual outdoor environment: a pilot study. *Cyberpsychol Behav.* 2006;9:388–95.
- Oddsson LI, Karlsson R, Konrad J, Ince S, Williams SR, Zemkova E. A rehabilitation tool for functional balance using altered gravity and virtual reality. *J Neuroeng Rehabil.* 2007;4:25.
- Thornton M, Marshall S, McComas J, Finestone H, McCormick A, Sveistrup H. Benefits of activity and virtual reality based balance exercise programmes for adults with traumatic brain injury: perceptions of participants and their caregivers. *Brain Inj.* 2005;19:989–1000.
- 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;88:693–701.
- Kizony R, Raz L, Katz N, Weingarden H, Weiss PL. Video-capture virtual reality system for patients with paraplegic spinal cord injury. *J Rehabil Res Dev.* 2005;42:595–608.
- Burdea GC, Lin MC, Ribarsky W, Watson B. Special issue on haptics, virtual, and augmented reality. *IEEE Trans Vis Comput Graph.* 2005;11:611–3.
- Jaffe DL, Brown DA, Pierson-Carey CD, Buckley EL, Lew HL. Stepping over obstacles to improve walking in individuals with poststroke hemiplegia. *J Rehabil Res Dev.* 2004;41:283–92.
- Keshner EA, Kenyon RV. The influence of an immersive virtual environment on the segmental organization of postural stabilizing responses. *J Vestib Res.* 2000;10:207–19.
- Gil-Gomez JA, Llorens R, Alcaniz M, Colomer C. Effectiveness of a Wii balance board-based system (eBaViR) for balance rehabilitation: a pilot randomized clinical trial in patients with acquired brain injury. *J Neuroeng Rehabil.* 2011;8:30.
- Saposnik G, Teasell R, Mamdani M, Hall J, McIlroy W, Cheung D, et al. Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. *Stroke.* 2011;41:1477–84.
- Barclay-Goddard R, Stevenson T, Poluha W, Moffatt ME, Taback SP. Force platform feedback for standing balance training after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2004;CD004129.
- De Haart M, Geurts AC, Dault MC, Nienhuis B, Duysens J. Restoration of weight-shifting capacity in patients with postacute stroke: a rehabilitation cohort study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86:755–62.
- Srivastava A, Taly AB, Gupta A, Kumar S, Murali T. Post-stroke balance training: role of force platform with visual feedback technique. *J Neurol Sci.* 2009;287:89–93.
- Blesa R, Pujol M, Aguilar M, Santacruz P, Bertran-Serra I, Hernandez G, et al. Clinical validity of the 'mini-mental state' for Spanish speaking communities. *Neuropsychologia.* 2001;39:1150–7.
- Sloan RL, Sinclair E, Thompson J, Taylor S, Pentland B. Inter-rater reliability of the modified Ashworth Scale for spasticity in hemiplegic patients. *Int J Rehabil Res.* 1992;15:158–61.
- Tyson SF, DeSouza LH. Development of the Brunel Balance Assessment: a new measure of balance disability post stroke. *Clin Rehabil.* 2004;18:801–10.
- Berg K, Wood-Dauphinee S, Williams JI. The Balance Scale: reliability assessment with elderly residents and patients with an acute stroke. *Scand J Rehabil Med.* 1995;27:27–36.
- Tinetti ME. Performance-oriented assessment of mobility problems in elderly patients. *J Am Geriatr Soc.* 1986;34:119–26.
- Baydal-Bertomeu JM, Viosca-Herrero E, Ortuño-Cortes MA. Estudio de eficacia y fiabilidad de un sistema de posturografía en comparación con la escala Berg. *Rehabilitación.* 2010;44:304–10.
- Witmer B., Singer M. Measuring presence in virtual environments: a presence questionnaire. *Presence.* 1998;7.
- Tyson SF, Hanley M, Chillala J, Selley A, Tallis RC. Balance disability after stroke. *Phys Ther.* 2006;86:30–8.
- Donoghue D, Stokes EK. How much change is true change? The minimum detectable change of the Berg Balance Scale in elderly people. *J Rehabil Med.* 2009;41:343–6.
- Faber MJ, Bosscher RJ, van Wieringen PC. Clinimetric properties of the performance-oriented mobility assessment. *Phys Ther.* 2006;86:944–54.

37. Stevenson TJ. Detecting change in patients with stroke using the Berg Balance Scale. *Aust J Physiother.* 2001;47: 29–38.
38. Basford JR, Chou LS, Kaufman KR, Brey RH, Walker A, Malec JF, et al. An assessment of gait and balance deficits after traumatic brain injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003;84: 343–9.
39. Pickett TC, Radfar-Baublitz LS, McDonald SD, Walker WC, Cifu DX. Objectively assessing balance deficits after TBI: Role of computerized posturography. *J Rehabil Res Dev.* 2007;44:983–90.
40. 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;36:1166–71.
41. Weiss PL, Bialik P, Kizony R. Virtual reality provides leisure time opportunities for young adults with physical and intellectual disabilities. *Cyberpsychol Behav.* 2003;6:335–42.
42. Weiss PL, Rand D, Katz N, Kizony R. Video capture virtual reality as a flexible and effective rehabilitation tool. *J Neuroeng Rehabil.* 2004;1:12.
43. Rossi-Izquierdo M, Soto-Varela A, Santos-Perez S, Sesar-Ignacio A, Labella-Caballero T, Rossi-Izquierdo M, et al. Vestibular rehabilitation with computerised dynamic posturography in patients with Parkinson's disease: improving balance impairment. *Disabil Rehabil.* 2009;31:1907–16.