

Evaluación Neurofisiológica del Entrenamiento de la Imaginación Motora con Realidad Virtual en Pacientes Pediátricos con Parálisis Cerebral

M.D. del Castillo^{a,*}, J.I. Serrano^a, S. Lerma^{b,c}, I. Martínez^b, E. Rocon^a

^a Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, 28500 Arganda del Rey, Madrid, España.

^b LAM, Hospital Universitario Infantil Niño Jesús, 28009 Madrid, España.

^c Centro Superior de Estudios Universitarios La Salle. Universidad Autónoma de Madrid.

Resumen

Existen diversas evidencias que indican que los déficits motores en los pacientes de parálisis cerebral se asocian con problemas en la planificación motora que, a su vez, apuntan a una mermada capacidad para imaginar movimientos. La imaginación motora se ha revelado como una herramienta efectiva en el aprendizaje y la adquisición de habilidades motoras ya que comparte estructuras neuronales similares con la ejecución motora. En este trabajo se presenta un paradigma basado en un juego de realidad virtual para guiar la actividad mental del paciente que sirve a dos fines: estudiar su capacidad de imaginar movimientos e implicar y motivar al paciente en el entrenamiento de dicha capacidad. El estudio ha involucrado cuatro niños con parálisis cerebral espástica (edad media = 13.25 años, DS = 1.5) con lesión cerebral bilateral. Los resultados obtenidos del análisis de su actividad electroencefalográfica muestran que estos pacientes son capaces de emplear la imaginación motora en una tarea de marcha, indicada por la presencia del fenómeno ERD (Event Related Desynchronization) en zonas corticales motoras, independientemente de su nivel funcional y de los miembros afectados.

Palabras Clave:

Bioingeniería, Discapacidad, Interfaces, Realidad Virtual, Rehabilitación, Imaginación Motora, EEG

Neurophysiologic Assessment of Motor Imagery Training by Using Virtual Reality for Pediatric Population with Cerebral Palsy

Abstract

There are several evidences showing that motor disorders in patients with cerebral palsy are associated with problems in motor planning, which, in turn, denote a diminished capability to imagine movements. Motor imagery appears like an effective means in learning and acquiring motor skills since it shares similar neural structures to those ones used in motor execution. In this paper, a paradigm based on a virtual reality game that drives the patient's electroencephalographic signal is presented. This study aims, on the one hand, to analyze the patients' ability of imagining movements and, on the other hand, to involve and motivate them in order to implement this ability. The research work has engaged four children with spastic cerebral palsy (mean age = 13.25, SD = 1.5) with bilateral brain damage. After analyzing their electroencephalographic signal, the results show that these patients are able of using motor imagery in a walking task, as indicated by the presence of ERD (event related desynchronization) in cortical motor areas, regardless their functional impairment and affected body extremities.

Keywords:

Bioengineering, Disability, Interfaces, Virtual Reality, Rehabilitation, Motor Imagery, EEG.

1. Introducción

La imaginación del movimiento (IM) es una capacidad cognitiva que permite que un sujeto realice y experimente acciones motoras en la mente sin implicar a los músculos en la ejecución del movimiento. Las regiones cerebrales implicadas

tanto en la imaginación como en la ejecución motora son fundamentalmente la corteza parietal, las áreas corticales motoras, los ganglios basales y el cerebelo (Iosa *et al.*, 2014). El entrenamiento de la imaginación ha demostrado que produce, para algunas tareas, ganancias funcionales incluso superiores a la actividad física en la respuesta motora (Ridderinkhof and Brass,

*Autor para la correspondencia: md.delcastillo@csic.es

2015). Esta mejora está asociada, de acuerdo a estudios de neuroimagen, con una reorganización funcional de los mapas neuronales activados mediante los movimientos imaginados (Sharma *et al.*, 2013). Puede considerarse una estrategia que promueve la facilitación asociativa de las vías eferentes de la corteza cerebral a los músculos y, de este modo, potencia el rendimiento en la ejecución real de movimientos (Niazi *et al.*, 2012).

Los sujetos con parálisis cerebral (PC) tienen afectada la conducta motora debido a lesiones cerebrales congénitas (Blair, 2010). Uno de los déficits motores es el de la incapacidad para planificar movimientos, que está relacionada con la falta de habilidad para imaginarlos o simularlos mentalmente (Spruijt *et al.*, 2013).

Los estudios experimentales sobre imaginación del movimiento en niños con PC son escasos y los resultados obtenidos son controvertidos. Mientras que algunos de los trabajos recogen que la lesión en el hemisferio izquierdo está relacionada directamente con la incapacidad de imaginar movimientos, apuntando a este hemisferio como dominante para la simulación mental de movimientos (Mutsaerts *et al.*, 2007), otros constatan que la capacidad de imaginar se puede entrenar con independencia del hemisferio dañado (Crajé *et al.*, 2010). La mayoría de estos trabajos emplean paradigmas de cronometría mental, de lateralidad manual o de marcha real y marcha a ciegas. Para validar el éxito del entrenamiento de la imaginación motora, utilizan fundamentalmente métricas como la precisión o el tiempo empleado en realizar, posteriormente al entrenamiento de la imaginación, una tarea motora real. En (Labruyère *et al.*, 2013) se desarrolla un juego de realidad virtual para niños con PC con el fin de promover la participación activa de los mismos en una terapia de rehabilitación motora, evaluando la misma mediante el ritmo cardíaco y electromiografía.

La realidad virtual es una tecnología que proporciona una realimentación sensorial artificial para percibir y experimentar acontecimientos y actividades como si fueran reales. En la actualidad, se ha comenzado a emplear la realidad virtual como una estrategia terapéutica para la rehabilitación de funciones motoras (Meyer-Heim and van Hedel, 2013). Este tipo de tratamiento ofrece la posibilidad de realizar actividades fuera del ámbito hospitalario con unas características atractivas, que motivan al usuario, y una intensidad mayor que las terapias tradicionales. La interacción del usuario con el entorno de realidad virtual puede llevarse a cabo mediante el movimiento de alguna parte de su cuerpo, detectado por sensores biométricos, y proyectado en una pantalla (Laver *et al.*, 2012) para pacientes con daño cerebral. También es posible plasmar visualmente el movimiento mediante una interfaz cerebro computador, como en (Lerma *et al.*, 2015), (Bayón *et al.*, 2017), para rehabilitar el inicio de la marcha para niños con PC. Existen múltiples estudios, para la rehabilitación funcional de la extremidad superior e inferior y de la marcha así como de la cognición, percepción y actividades de la vida diaria (Rose *et al.*, 2005), que ponen de manifiesto que esta tecnología es una herramienta prometedora para diagnosticar, monitorizar e inducir una recuperación funcional en lesiones del sistema nervioso.

Son escasos los estudios que evalúan la neuroplasticidad resultante del entrenamiento de la imaginación motora mediante técnicas de neuroimagen. Así mismo, apenas existen trabajos en los que se analice la señal electroencefalográfica (EEG) y su evolución a lo largo del entrenamiento. En (Shin *et al.*, 2012) se desarrolla un método para construir mapas topográficos de patrones de activación cortical en niños con parálisis cerebral y niños sanos cuando realizan tareas de imaginación motora. Sin embargo, no se lleva a cabo ningún análisis del cambio de

patrones de actividad cerebral derivado de la práctica de dichas tareas.

En el presente trabajo se pretende evaluar la capacidad de imaginar el movimiento de un grupo de niños con PC en ambos hemisferios cerebrales. El objetivo principal es realizar un estudio exploratorio que permita dilucidar sobre la controvertida hipótesis que afirma que si el hemisferio izquierdo está dañado, no es posible ejercitar la imaginación de movimiento. Para llevarlo a cabo, se ha investigado acerca de la presencia de un fenómeno neurofisiológico que tiene lugar previo y durante la realización o imaginación de un movimiento en sujetos sanos. Este fenómeno se manifiesta mediante una caída de la potencia de la señal electroencefalográfica (Pfurtscheller and da Silva, 1999).

Dado que la participación activa de los pacientes en el ámbito de la rehabilitación es esencial para mejorar el aprendizaje y el control motor, una manera de promover su implicación es a través del uso de un juego de realidad virtual. La dinámica del juego, en este estudio, persigue facilitar la presencia y la captura de la actividad cortical asociada al estado mental objetivo como es el de la imaginación del movimiento. En ningún caso, esa actividad electroencefalográfica se emplea para controlar el entorno de realidad virtual, más bien al contrario: es el entorno el que guía la actividad mental del paciente.

2. Materiales y Métodos

2.1. Participantes

El estudio ha involucrado cuatro niños con parálisis cerebral espástica (edad media = 13.25 años y DS = 1.5), dos dipléjicos (más afectadas las extremidades inferiores que las superiores) y dos tetrapléjicos (similar afectación de extremidades inferiores y superiores), que han sufrido una intervención quirúrgica ortopédica multinivel para corregir deformidades y reestructurar la marcha.

Todos presentaban en el estudio de resonancia magnética leucomalacia peri-ventricular y tenían distintos niveles funcionales de ambulación previos a la intervención de acuerdo al Gross Motor Functional Classification System (GMFCS).

La tabla 1 recoge los datos clínicos y demográficos diferenciales de cada paciente.

Tabla 1: Características topográficas de la lesión, demográficas y nivel de ambulación funcional

Paciente	Clasificación topográfica	Prematuridad	Edad	GMFCS
P1	Diplejía	Sí	11	II
P2	Diplejía	No	14	II
P3	Tetraplejía	Sí	14	III
P4	Tetraplejía	Sí	14	IV

2.2. Captura de la Señal Electroencefalográfica

Para entrenar la imaginación de movimiento se emplean unas gafas de realidad virtual (Oculus Rift DK2) que muestran al paciente un entorno virtual (Unreal Development Kit UDK-2013-09), que recorre caminando en primera persona. Simultáneamente se recoge su señal electroencefalográfica (EEG) a través de los canales AFz, F3, F1, Fz, F2, F4, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6, C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6, P1, Pz y P2 (según el sistema internacional 10-20) mediante electrodos activos Ag/AgCl (Acticap, Brain Products GmbH, Germany). El potencial de

referencia se tomó en el lóbulo de la oreja izquierda y el canal AFz se empleó como tierra. Se amplificó la señal (actiCHamp, Brain Products GmbH, Germany) y se muestreó a 256 Hz.

2.3. Procedimiento y Estímulos

Cada paciente es informado de que el entorno consta de 22 obstáculos diferentes ante los que el avatar se detiene y desaparecen, si el paciente se relaja. Una vez que desaparece el obstáculo, se le indica que imagine el movimiento de sus piernas iniciando la marcha y pasados 3 segundos, el avatar reanuda automáticamente la marcha. La situación se repite cada vez que aparece un nuevo obstáculo, presentando la prueba una duración total de 18 minutos. La Figura 1 muestra la dinámica que guía la adquisición de la señal EEG para el tipo de obstáculo puerta. En el primer intervalo de 3 segundos se captura la señal EEG para el estado de relajación, en el segundo se captura la señal para el estado de preparación de la imaginación y en el tercer intervalo, se captura para el estado de imaginación del movimiento. El recorrido y cada obstáculo (fuego, agua, puerta, etc.) se acompaña de sonido ambiente para acrecentar su realismo. El paciente no tiene control real sobre el entorno.

La capacidad para imaginar el movimiento se mide por la presencia del fenómeno neurofisiológico de la desincronización de la densidad espectral de potencia (PSD) de la señal en el período en el que se imagina el movimiento, conocido en inglés como ERD (Event Related Desynchronization). El valor de ERD se define como el porcentaje de caída de la potencia (Pfurtscheller and da Silva, 1999) de acuerdo a (1)

$$ERD\% = ((PSD - PSD_r)/PSD_r) \times 100 \quad (1)$$

siendo PSD la densidad espectral de potencia en una banda de frecuencia en el intervalo de tiempo elegido, y PSD_r la del intervalo de referencia o intervalo de relajación. El valor de ERD, en este estudio, se calcula para los intervalos en los que el obstáculo desaparece y cuando el avatar comienza a caminar.

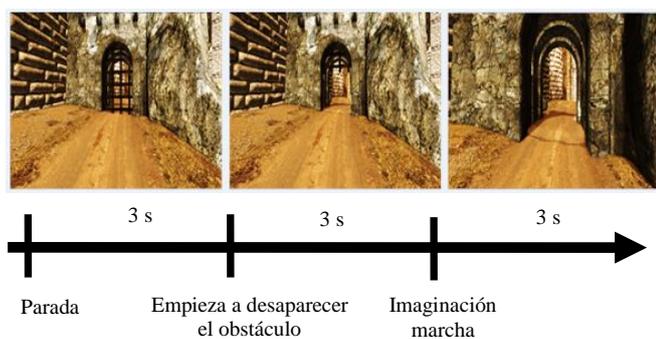


Figura 1: Ejemplo de obstáculo presentado y de los intervalos de tiempo en los que se captura la señal EEG.

2.4. Análisis de datos

Se eliminaron artefactos de la señal EEG continua empleando el método ASR (Artifact Subspace Reconstruction) (Mullen *et al.*, 2013) basado en componentes principales. Con este método se eliminan los componentes principales de la señal referidos a artefactos que producen grandes desviaciones, como movimientos bruscos o espasmos, frecuentes en los pacientes de este estudio. A continuación, la señal se filtró en la banda de 4 Hz a 30 Hz.

Para cada paciente, se dividió la señal EEG en fragmentos de 9s correspondientes a cada obstáculo del recorrido virtual (3 s de reposo, 3 s de retirada del obstáculo, 3 s de imaginación de la

marcha). A continuación, se aplicó en todos los fragmentos el algoritmo MARA de eliminación de artefactos, basado en análisis de componentes independientes (Winkler *et al.*, 2011). Con este método se eliminaron las componentes independientes que predominaban en todos los fragmentos y que eran características de artefactos conocidos, como parpadeo o latido cardiaco. Cada fragmento de 9 s, a su vez, se dividió en ventanas de 0.5 s solapadas con una separación de 212.5 ms entre cada una (un total de 400 ventanas, 57,5% de solapamiento). Finalmente, para cada banda de frecuencia de 1 Hz, entre 4 Hz y 30 Hz, se obtuvo la densidad espectral de potencia de cada ventana empleando el método de Welch (ventanas de Hamming).

Para cada banda de frecuencia de 1Hz, se realizó un test t de la diferencia entre la PSD en las 400 ventanas de reposo (todas aquellas en los 3 primeros segundos de cada fragmento de 9 s) y la PSD de cada una de las 400 ventanas de las dos restantes partes de cada fragmento, a lo largo de todos los fragmentos. Para aquellas ventanas en la que existiera una diferencia significativa ($p < .05$) entre las mismas y las de reposo en todos los fragmentos, se calculó la relación de PSD entre ellas y las de reposo mediante la siguiente fórmula

$$PSD_{rel} = PSD_{media_{reposo}} / PSD_{media_{reposo}} - PSD_{ventana} \quad (2)$$

3. Resultados

Los resultados obtenidos tras el análisis de la señal electroencefalográfica de los cuatro pacientes muestran que todos son capaces de emplear la imaginación motora en una tarea de marcha, independientemente de su nivel funcional previo a la intervención y de los miembros y hemisferios cerebrales afectados.

Las relaciones con diferencias significativas obtenidas tras el análisis de datos para los cuatro pacientes se representan con colores en los mapas de tiempo/frecuencia de las Figuras 2 a 5. En cada mapa, el eje X representa el tiempo en milisegundos de captura de la señal EEG para su análisis dividido por líneas de puntos en tres intervalos: relajación (desde -3000 ms a 0 ms), desaparición de obstáculo (desde 0 ms a 3000 ms) y de imaginación (desde 3000 ms a 6000 ms). El eje Y representa la frecuencia entre 4 Hz y 30 Hz. El color de cada cuadro refleja el valor de PSD_{rel} de acuerdo a la barra mostrada debajo de cada figura. El color verde claro de fondo indica que no existen diferencias de potencia significativa con respecto al periodo de reposo.

En todos los sujetos se observa la desincronización de los ritmos cerebrales alfa y/o beta en el período de desaparición del obstáculo (entre 0 ms y 3000 ms), que se relaciona con la preparación de la imaginación de movimiento, y en el período de imaginación del movimiento posterior e inicio de la marcha del avatar (entre 3000 ms y 6000 ms).

La localización cortical de la desincronización para los cuatro pacientes se da en los canales C1, C2 y Cz, que se recogen en los mapas a), b) y c), respectivamente de cada figura (Figuras 2-5). Las frecuencias a las que tiene lugar este fenómeno neurofisiológico y su duración son propias de cada uno de los pacientes. Los recuadros en color fucsia de las figuras delimitan las bandas de frecuencias consecutivas en las que la desincronización es superior al 30%, de manera estadísticamente significativa, y dicha desincronización comienza durante la imaginación del movimiento, acaba después del inicio del mismo y se da al menos durante dos segundos sin sincronizaciones intercaladas.

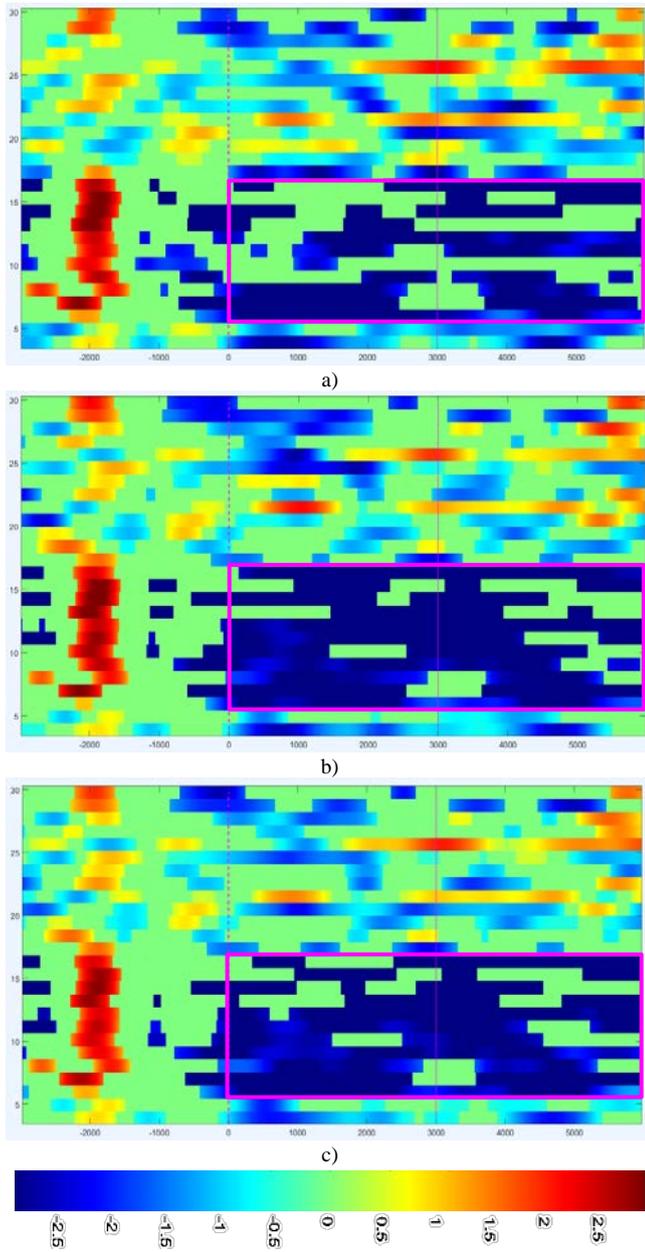


Figura 2: Mapas tiempo-frecuencia medios relativos al periodo de reposo para el paciente P1 de los canales C1, C2, Cz (a, b, c).

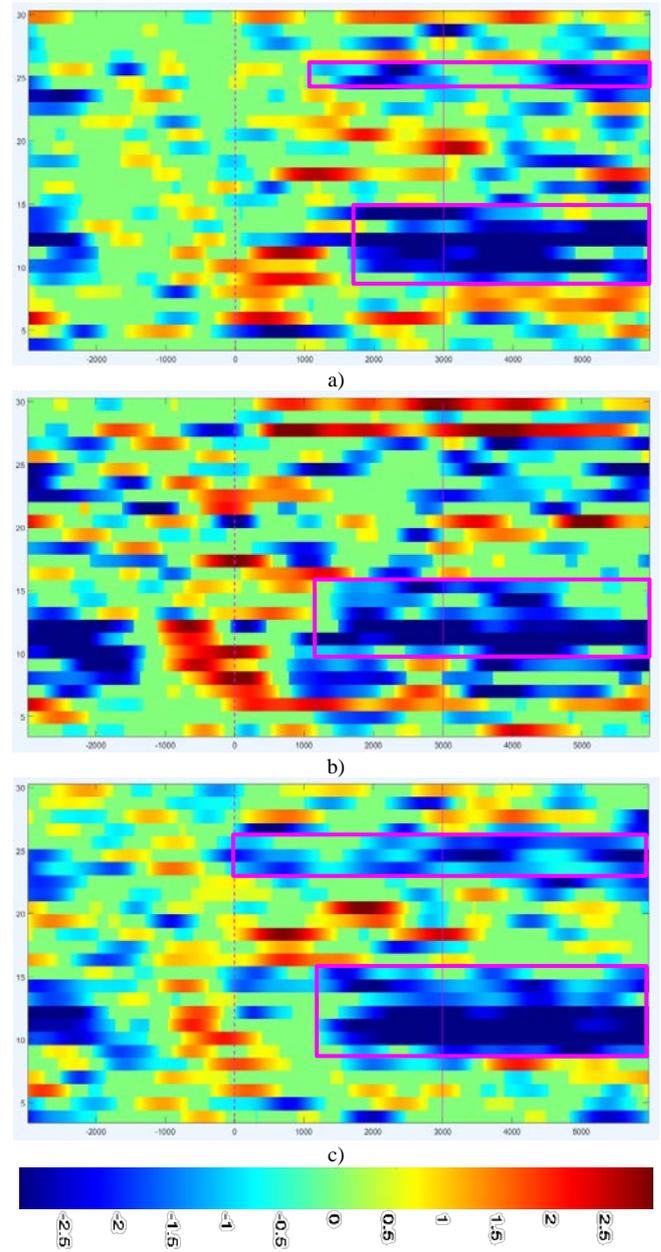


Figura 3: Mapas tiempo-frecuencia medios relativos al periodo de reposo para el paciente P2 de los canales C1, C2, Cz (a, b, c).

4. Discusión

En general, aunque todos los pacientes presentan el fenómeno de desincronización, se observa como el número de bandas consecutivas en las que se produce el mismo decrece en los pacientes P3 y P4, para los que el GMFCS es mayor, como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2: Número medio de bandas de frecuencia consecutivas en las que se da la ERD antes y después del movimiento durante al menos 2 segundos, para cada paciente en los canales C1, C2 y Cz.

Paciente	Nº medio de bandas consecutivas con ERD (desviación estándar)	GMFCS
P1	9.33 (1.53)	II
P2	5.25 (0.96)	II
P3	1.50 (0.53)	III
P4	1.00 (0.00)	IV

Es decir, a mayor discapacidad motora son menores los rangos de frecuencia que presentan desincronización relacionada con la imaginación del movimiento. Además, en los pacientes con GMFCS III y IV, los rangos de frecuencia desincronizados se concentran más en la zona alfa (entre 7 y 13 Hz) y desaparecen de la zona beta (entre 13 y 30 Hz). Aun así, el fenómeno aparece en todos los pacientes promovido por la realidad virtual inmersiva, indicando actividad relacionada con la imaginación motora.

Dadas las características de los daños cerebrales de la población reclutada, con ambos hemisferios lesionados, los resultados neurofisiológicos obtenidos apuntan a una intervención de ambos hemisferios en la tarea de imaginación lo que permitiría refutar la hipótesis de que el entrenamiento de la imaginación del movimiento solo es útil en pacientes neurológicos con el hemisferio izquierdo no afectado. De hecho, los resultados plantean una nueva cuestión de en qué hemisferio centrar el entrenamiento: en el sano, en el afecto o en ambos.

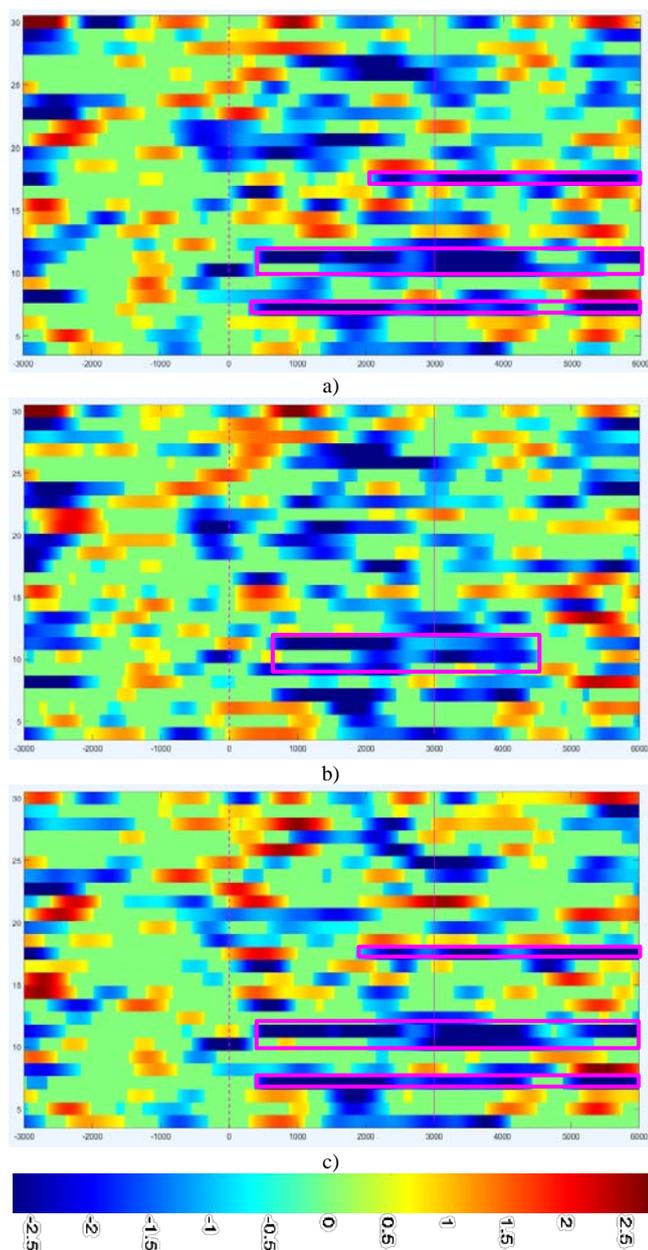


Figura 4: Mapas tiempo-frecuencia medios relativos al período de reposo para el paciente P3 de los canales C1, C2, Cz (a, b, c).

La estrategia para imaginar, basada en realidad virtual, produce la excitación cortical de la zona motora relacionada con la marcha. Dicha excitación, sincronizada temporalmente con la retroalimentación visual del movimiento en un entorno virtual inmersivo promueve la facilitación asociativa de las vías eferentes de la corteza cerebral a los músculos (Niazi *et al.*, 2012), (Weiss *et al.* 2014). Esta facilitación en sí se considera un efecto de neurorrehabilitación, pero además puede potenciar los beneficios posteriores de la rehabilitación física ya sea aplicando terapia convencional o enfoques neurorrobóticos (Chang *et al.* 2015).

El artículo presenta algunas limitaciones, por lo que los resultados obtenidos han de interpretarse teniendo en cuenta las mismas. El número de pacientes del estudio es muy reducido, por lo que no se pueden obtener estadísticas significativas. Aunque la muestra es variada en cuanto al grado de discapacidad y afectación de los miembros, no es lo suficientemente amplia para recoger todas las tipologías y grados de afectación de los pacientes con parálisis cerebral.

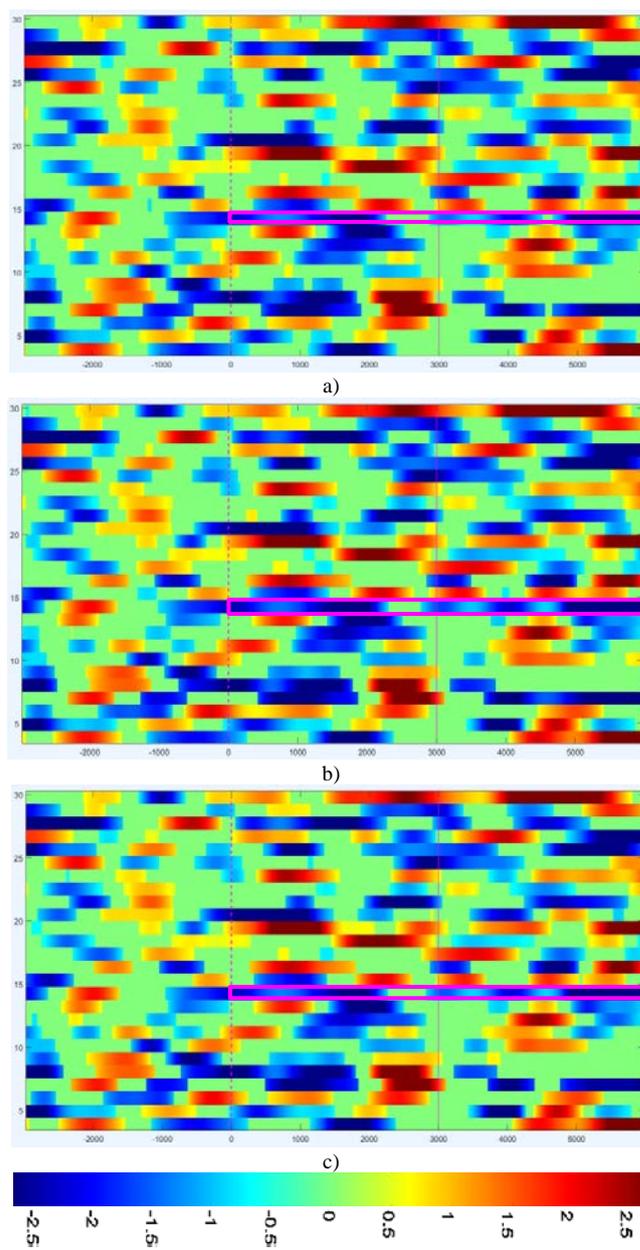


Figura 5: Mapas tiempo-frecuencia medios relativos al período de reposo para el paciente P4 de los canales C1, C2, Cz (a, b, c).

La detección del fenómeno ERD se ha realizado de manera visual por dos clínicos expertos (S.L. e I.M.) sobre los mapas de tiempo-frecuencia, pero sus características no han sido cuantificadas de manera automática. Las consecuencias de la utilización de un entorno de realidad virtual enriquecido e inmersivo para la ayuda de la promoción de la imaginación motora contrasta con lo evidenciado en la literatura sobre la incapacidad de imaginación motora de pacientes con ambos hemisferios afectados. Estos resultados apuntan a posibles beneficios de este tipo de entornos virtuales en la neurorrehabilitación de pacientes con parálisis cerebral. Sin embargo, nótese que el presente estudio no pretende demostrar la superioridad de este tipo de entornos frente a entornos más sencillos o protocolos de otra naturaleza.

5. Conclusión

La imaginación motora es una técnica que ha ganado gran popularidad en el entrenamiento deportivo y musical o en la

rehabilitación tras un daño cerebral en adultos porque produce una mejora del rendimiento motor (Ridderinkhof and Brass, 2015). Los hallazgos en adultos con ictus apuntan que el entrenamiento de la imaginación motora puede emplearse como una estrategia para inducir plasticidad neuronal y, con ello, a recuperar la función motora en sujetos que padecen daño cerebral (You *et al.*, 2005).

En este estudio se ha analizado la imaginación motora de niños con PC utilizando un entorno lúdico para facilitar la inmersión y la participación del paciente e investigar su papel como herramienta terapéutica en la rehabilitación de la planificación motora. Con ello, se podría favorecer la recuperación funcional de la marcha posterior a la operación que han sufrido.

De los resultados extraídos del mismo, es posible concluir que todos los pacientes han sido capaces de implicarse activamente en la tarea propuesta, como muestra la presencia de ERD en zonas corticales motoras, independientemente de su nivel funcional y de los miembros afectados.

De las conclusiones del presente estudio se derivan directamente dos trabajos a realizar a continuación, ambos con la mayor ampliación posible de la muestra. El primero es la comparación de la evolución clínica y funcional de pacientes que, tras la intervención quirúrgica multinivel, utilicen el enfoque de realidad virtual propuesto con respecto a pacientes que no lo usen. El segundo es la comparación de los efectos del entorno de realidad virtual utilizado con otros entornos más sencillos no inmersivos y de diferente naturaleza, como la terapia ocupacional o la estimulación cerebral no invasiva.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos CP-WALKER (DPI2012-39133-C03-01), MD (PIE-201650E055) y NeuroMOD (DPI2015-68664-C4-1-R).

Referencias

- Bayón, C., Ramírez, O., Serrano, J.I., del Castillo, M.D., Pérez-Somarriba, A., Belda-Lois, J.M., Martínez-Caballero, I., Lerma-Lara, S., Cifuentes, C., Frizera, A., Rocon, E., 2017. Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with cerebral palsy: CPWalker. *Robotics and Autonomous Systems*, 91, 101-114.
- Blair, E., 2010. Epidemiology of the cerebral palsies. *Orthopedic Clinics of North America*, 41, 441-55.
- Chang, M.C., Kim, D.Y., Park, D.H., 2015. Enhancement of cortical excitability and lower limb motor function in patients with stroke by transcranial direct current stimulation. *Brain Stimulation*, 8(3), 561-566.
- Crajé, C., van Elk, M., Beeren, M., van Schie, H.T., Bekkering, H., Steenbergen, B., 2010. Compromised motor planning and motor imagery in right hemiparetic cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 31(8), 1313-1322. DOI: 10.1016/j.ridd.2010.07.010
- Iosa, M., Zocolillo, L., Montesi, M., Morelli, D., Paolucci, S., Fusco, A., 2014. The brain's sense of walking: a study on the intertwine between locomotor imagery and internal locomotor models in healthy adults, typically developing children and children with cerebral palsy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(359), 1-9. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00859
- Labruyère, R., Gerber, C.N., Birrer-Brütsch, K., Meyer-Heim, A., van Hedel, H., 2013. Requirements for and impact of a serious game for neuro-pediatric robot-assisted gait training. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 3906-3915. DOI: 10.1016/j.ridd.2013.07.031
- Laver, K., George, S., Thomas, S., Deutsch, J.E., Crotty, M., 2012. Cochrane review: virtual reality for stroke rehabilitation. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 48(3), 523-530.
- Lerma, S., del Castillo, M.D., Serrano, J.I., Rocon, E., Raya, R., Martínez, I., 2015. EEG control of gait in children with cerebral palsy. Preliminary data for the construction of a brain computer interface. *Gait & Posture* 42, S42. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2015.06.082.
- Meyer-Heim, A., van Hedel, H.J.A., 2013. Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy: current state and clinical implementation. *Seminars in Pediatric Neurology*, 02, 139-145.
- Mullen, T., Kothe, C., Chi, Y.M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., Cauwenberghs, G., Jung, T.-P., 2013. Real-time modeling and 3d visualization of source dynamics and connectivity using wearable EEG. In *Proceedings of IEEE EMBS*, 2013, pp. 2184-2187.
- Mutsaerts, M., Steenbergen, B., Bekkering, H., 2007. Impaired motor imagery in right hemiparetic cerebral palsy. *Experimental Brain Research*, 172, 151-162.
- Niazi, I.K., Mrachacz-Kersting, N., Jiang, N., Dremstrup, K., Farina, D., 2012. Peripheral electrical stimulation triggered by self-paced detection of motor intention enhances motor evoked potentials. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 20(4), 595-604.
- Pfurtscheller, G., da Silva, F. H. L. 1999. Event-related EEG/EMG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1842-1857.
- Ridderinkhof, K.R., Brass, M., 2015. How kinesthetic motor Imagery works: a predictive-processing theory of visualization in sports and motor expertise. *Journal of Physiology*, 109, 35-63.
- Rose, F.D., Brooks, B.M., Rizzo, A., 2005. Virtual reality in brain damage rehabilitation: review. *Cyberpsychology Behavior*, 8(3), 241-62.
- Sharma, N., Baron, J.C., 2013. Does motor imagery share neural networks with executed movement: a multivariate fMRI analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7:564.
- Shin, Y.K., Lee, D.R., Hwang, H.J., You, S.J., Im, C.H., 2012. A novel EEG-based brain mapping to determine cortical activation patterns in normal children and children with cerebral palsy during motor imagery tasks. *Neurorehabilitation*, 31(4), 349-355. DOI: 10.3233/NRE-2012-00803
- Sprijt, S., van der Kamp, J., Steenbergen, B., 2015. Current insights in the development of children's motor imagery ability. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 4154-60.
- Weiss, P.L., Keshner, E.A., Levin, M.F. (eds.), 2014. *Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation*, Springer.
- Winkler, I., Haufe, S., Tangermann, M., 2011. Automatic classification of artifactual ICA-Components for artifact removal in EEG signals. *Behavioral and Brain Functions*, 7(30), 1-15.
- You, S.H., Jang, S.H., Kim, Y.H., Hallett, M., Ahn, S.H., Kwon, Y.H., Kim, J.H., Lee, M.Y., 2005. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study. *Stroke*, 36(6), 1166-1171.