

# Assessment of Neuromuscular Control through Muscle Synergy in Patients with Cerebral Palsy after Selective Dorsal Rhizotomy

Santiago Beron<sup>1</sup>, Marcos Crespo<sup>2</sup> and Emiliano Pablo Ravera<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Argentina.*

<sup>2</sup> *Laboratorio de análisis de marcha y movimiento, LAMM y Tecnología en rehabilitación, Clínica de tecnología asistiva, TA. Fleni, Escobar, Argentina*

<sup>3</sup> *Grupo de Análisis, Modelado, Procesamiento e Implementaciones Clínicas de Señales y Sistemas Biomecánicos, Instituto de Bioingeniería y Bioinformática (IBB), CONICET-UNER, Oro Verde, Argentina.*

<sup>4</sup> *Laboratorio de Investigación del Movimiento Humano (LIMH), Facultad de Ingeniería, Oro Verde, Argentina.*

---

**Summary**— Gait in children with cerebral palsy (CP) is characterized by alterations resulting from the combination of various neurological factors, including spasticity. Selective dorsal rhizotomy (SDR) is one of the most commonly prescribed treatments for these children to alleviate spasticity. Different strategies have been proposed in the literature to describe the neuromuscular control required by studying surface electromyography of the muscles in the lower limb. In this way, non-negative matrix factorization has been utilized to identify muscle synergies. This study aims to investigate the behavior of muscle synergies in a group of children with CP who underwent SDR to eliminate muscle spasticity and improve their walking. Therefore, we studied a group of children with CP who were treated at the Fleni Institute and underwent gait analysis before and after SDR. Additionally, to assess changes in muscle synergies, the study included a control group of typically developing children.

Our results show improvement in gait of children with CP after SDR, with a significant increase in the range of knee flexion-extension movement. Consistent with the literature, our findings indicate that children with CP exhibit simplified muscle control during gait (evaluated through muscle synergies) compared to typically developing children. Furthermore, we observed no statistically significant changes in motor control among children with CP after SDR. These results suggest that post-surgical rehabilitation may not have an impact on synergy structures due to altered neural plasticity in children with CP. Alternatively, it is possible that these children may require a longer period of rehabilitation to allow the central nervous system to acquire new synergies that enable more complex motor control, similar to typically developing children.

**Keywords**— cerebral palsy, muscle synergies, selective dorsal rhizotomy, gait analysis

---

**Resumen**— La marcha de los niños con parálisis cerebral (PC) se caracteriza por presentar alteraciones debido a la combinación de diversos factores neurológicos, uno de los cuales es la espasticidad. Por este motivo, uno de los tratamientos más comunes que se prescriben a estos niños es la rizotomía dorsal selectiva (RDS) para eliminar la espasticidad. Existen diferentes estrategias para describir el control neuromuscular requerido en la marcha a partir de estudiar la electromiografía superficial de los músculos del miembro inferior. Dentro de estas se destaca el uso de una descomposición matricial no negativa. En este contexto, este trabajo busca estudiar el comportamiento de las sinergias musculares en un grupo de niños con CP que fueron sometidos a una RDS para eliminar la espasticidad muscular y así mejorar sus caminar. Así, se estudió un grupo de niños con CP que fueron atendidos en el Instituto Fleni y contaban con un análisis de la marcha antes y después de la RDS. Además, para valorar los cambios en las sinergias musculares el estudio incluyó a un grupo de niños sin patologías del movimiento.

Nuestros resultados muestran que los niños con CP mejoran su marcha luego de una SDR, evidenciando un notable incremento en el rango del movimiento de la flexión-extensión de la rodilla. Acorde a la bibliografía, los niños con PC presentaron un control muscular más simplificado en comparación con niños que caminan sin patologías del movimiento. Además, observamos que no existen cambios estadísticamente significativos del control motor de los niños con PC luego de una RDS, lo cual podría indicar que la rehabilitación posterior a la cirugía no tiene un impacto en las estructuras de sinergias por existir una plasticidad neural alterada en los niños con CP o que estos niños requieran un mayor tiempo de rehabilitación para lograr que el sistema nervioso central adquiera nuevas sinergias que le permitan complejizar el control motor, más semejante a niños sin patologías.

**Palabras clave**— parálisis cerebral, sinergias musculares, rizotomía dorsal selectiva, análisis de la marcha

---

## I. INTRODUCCIÓN

La Parálisis Cerebral (PC) es un término utilizado para definir una serie de trastornos motores de origen cerebral, no progresivos, que constituyen una de las principales causas de discapacidad motora infantil [1]. Dentro de las alteraciones presentes en la PC, la espasticidad es la más común que padecen los niños con una incidencia del 75%. El tono muscular normal se mantiene mediante la interacción equilibrada de la influencia excitatoria aferente de los husos musculares y la influencia inhibitoria de las vías descendentes extrapiramidales. En la PC, el daño en el

cerebro impide que las vías descendentes proporcionen su influencia inhibitoria. La rizotomía dorsal selectiva (RDS) es una técnica quirúrgica que se realiza para reducir la entrada excitatoria de las vías aferentes y disminuir el aumento anormal del tono muscular observado [2].

Las sinergias musculares pueden ser concebidas como una biblioteca de subtareas motoras que el sistema nervioso central combina de forma flexible para producir movimientos complejos y naturales. Un único comando neural puede reclutar una sinergia muscular para producir de manera confiable la subtarea motora [3]. De esta manera, en la literatura se proponen diversos algoritmos matemáticos de factorización sobre registros de la actividad eléctrica

muscular (EMG) para identificar espacios dimensionales compuestos por grupos ponderados de músculos (denominados sinergias) que pueden describir la variación total de la actividad muscular [4].

Así, las sinergias se utilizan para comprender las estrategias que utiliza el sistema nervioso central para producir movimientos voluntarios y los mecanismos neuronales alterados responsables de condiciones que alternan la marcha normal [5]. Recientemente, su uso se ha extendido a la evaluación clínica de pacientes con trastornos motores y a la predicción de mejoras luego de un tratamiento en niños con PC [3]. En particular, se ha explorado el uso de las sinergias musculares para facilitar la predicción computacional de los patrones de movimiento individuales y mejorar la eficacia de los programas de rehabilitación personalizados [6].

En el presente trabajo, se utilizan las sinergias para evaluar el control neuromuscular en niños con PC luego de ser sometidos a una RDS para disminuir la espasticidad muscular. En este punto, la hipótesis que guía nuestro trabajo es que las sinergias musculares no van a mostrar cambios significativos luego de realizarse una RDS, a pesar de las mejoras que se ven en los patrones de marcha luego de la cirugía, debido a que la misma no aborda las anomalías en el sistema nervioso central.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Base de datos

La base de datos utilizada en este trabajo está formada por dos grupos, un grupo de niños con PC (grupo PC) y un grupo de niños sin patologías de la marcha (grupo control). La base de datos del grupo PC consiste en el registro del análisis de la marcha realizado en el Laboratorio de Análisis de la Marcha y el Movimiento de Fleni. Los registros incluyeron datos de la cinemática de la marcha y los registros de las señales de EMG de los músculos Recto femoral izquierdo (LRF) y derecho (RRF), Semimembranoso izquierdo (LSM) y derecho (RSM), Tibial izquierdo anterior (LTA) y derecho (RTA), Gastrocnemio izquierdo (LGAM) y derecho (RGAM), y Vasto izquierdo (LV) y derecho (RV). Estos registros cuentan con la aprobación del comité de ética de la Institución.

Los registros de los niños con PC incluyeron tanto estudios de la marcha antes de la RDS (condición Pre) como también estudios de la marcha luego de la RDS (condición Post). Estos registros fueron recolectados en un período de tiempo donde se utilizaron en la Institución dos técnicas quirúrgicas diferentes en la RDS: una técnica más selectiva (Post conservadora) y una técnica más convencional (Post clásica) [7]. Debido al procedimiento de la técnica convencional, no se cuenta con registros de EMG luego de la cirugía. Asimismo, no se cuenta con los registros antes y después de la RDS de todos los niños. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el grupo PC contó con los registros de 30 niños antes de ser sometidos a la RSD (condición Pre) y 35 niños luego de ser sometidos a la SDR, 21 sometidos a RDS conservadora (Post conservadora) y 14 sometidos a RDS clásica (Post clásica).

### B. Análisis Clínico de la Marcha

El gesto de la marcha desarrollado a suelo nivel y a velocidad libre autoseleccionada fue registrado utilizando un sistema

de captura del movimiento de BTS (<https://www.btsbioengineering.com/products/bts-gaitlab/>). Se utilizó el modelo de procesamiento clásico de BTS para obtener los patrones cinemáticos de la marcha. Se extrajo la cinemática del plano sagital de la rodilla para su análisis.

### C. Cálculo de Sinergias

Las sinergias musculares se calcularon mediante el algoritmo de factorización matricial no negativa. Este algoritmo permite obtener las sinergias ( $W$ ) y la activación relativa de esas sinergias ( $C$ ) basados en el siguiente modelo:

$$\text{activaciones musculares} = W \cdot C + \text{error}, \quad (1)$$

donde  $W$  es una matriz de  $m \times n$  ( $m$  es el número de músculos y  $n$  es el número especificado de sinergias),  $C$  es una matriz de  $n \times t$ , donde  $t$  es cada instante de tiempo. Así, cada columna de  $W$  representa la ponderación relativa de los músculos en cada sinergia y cada fila de  $C$  representa el nivel de activación de cada sinergia durante el ciclo de la marcha [4]. En este modelo, las activaciones temporales de cada sinergia muscular identificadas pueden ser interpretadas como expresiones de actividades neuronales [5].

De esta manera, una medida de la complejidad del control muscular utilizado por un individuo durante la marcha es la evaluación de la variación de la actividad muscular explicada por un número determinado de sinergias ( $VAF$ ).

La varianza total explicada ( $VAF$ ) por  $n$  sinergias se calcula de la siguiente manera [4] :

$$VAF = 1 - \frac{\|EMG - W \cdot C\|^2}{\|EMG\|^2} \quad (2)$$

Este índice muestra una medida de cuánta información se representa correctamente mediante la factorización aplicada (1). Un  $VAF$  más alto indica una mejor calidad de la reconstrucción.

Se calculó la media y la desviación estándar de la cinemática articular de la rodilla y el EMG durante la marcha para cada ciclo de marcha y cada participante. Se utilizó el paquete Python de mapeo paramétrico estadístico unidimensional `spm1D` (<https://spm1d.org/>) para evaluar las diferencias de las formas de onda de las sinergias de activaciones de los grupos Pre y Post conservadora para verificar si en algún momento del ciclo de la marcha hay diferencias significativas entre estos grupos, considerando 3 y 4 sinergias. Se usó la prueba t apareada con corrección de Bonferroni ( $\alpha = 0.05$ ) para calcular un mapa paramétrico estadístico para cada parámetro y comparación. Se incluyó el comportamiento de las sinergias y sus respectivas activaciones para el grupo de control para referencia.

## III. RESULTADOS

Luego de la RDS se observa un incremento en la flexión de la rodilla independientemente de la técnica quirúrgica implementada. Sin embargo, aquellos niños que fueron intervenidos mediante la técnica conservadora presentan patrones de marcha más cercanos al grupo de control (Figura 1).

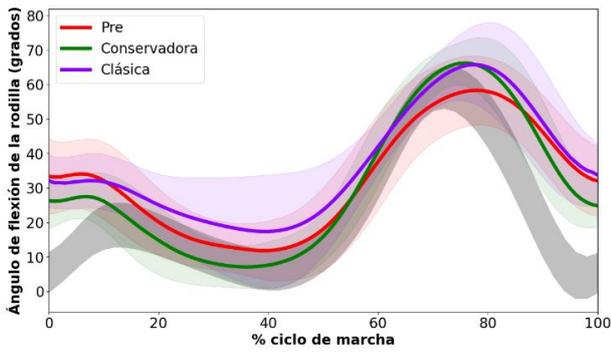


Fig. 1: Ángulos de flexión de rodilla para los grupos Pre, Post clásica y Post conservadora. Los valores promedios se muestran en líneas azul, verde y roja respectivamente. En el mismo color, se muestran regiones que indican los desvíos estándar para cada grupo. La región gris indica los valores esperados para el grupo control.

La Fig. 2a) muestra el comportamiento de la VAF para los grupos de estudio a medida que se incrementan las sinergias de 1 a 7. Menos sinergias son requeridas para explicar la VAF durante la marcha en los grupos Pre y Post conservadora en comparación con el grupo control.

El porcentaje de niños del grupo de control y CP (antes y después de la RDS) para explicar el 80% de la VAF en cada sinergia se especifica en la tabla 1. Para explicar el 80% de la VAF los grupos Pre y Post Conservadora se requieren 2 y 3 sinergias para un mayor porcentaje de pacientes, mientras que para realizar lo mismo se requieren 4 sinergias en el grupo control.

El promedio y desvío estándar de las activaciones en los grupos Pre, Post Conservadora y grupo de control para 3 y 4 sinergias se observa, en la figura 2c y 2d respectivamente. Se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas en las sinergias de activación en los niños con CP antes y después de la RDS. Sin embargo, existen diferencias marcadas de amplitud en la última sinergia de activación cuando se comparan con el grupo de control, tanto para 3 como para 4 sinergias.

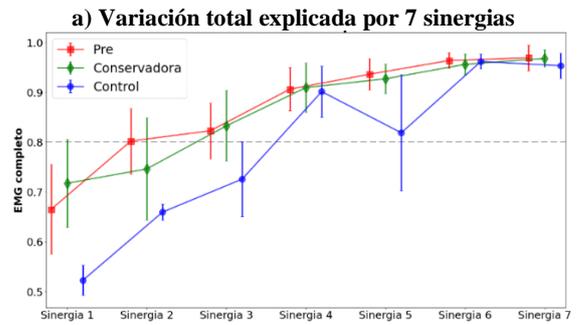
IV. DISCUSIÓN

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar si existen cambios en el control neuromuscular de niños con PC cuando caminan luego de haber recibido un tratamiento quirúrgico de RDS para disminuir la espasticidad de los músculos del miembro inferior. Para esto se propuso estudiar las sinergias musculares para comprender si existen cambios en las estrategias que utiliza el sistema nervioso central para producir movimientos voluntarios luego de esta cirugía. En este aspecto surge la hipótesis que supone que cambios en los patrones de marcha luego de una RDS no implica cambios en el control neuromuscular debido a que la cirugía no afecta al sistema nervioso central de manera directa.

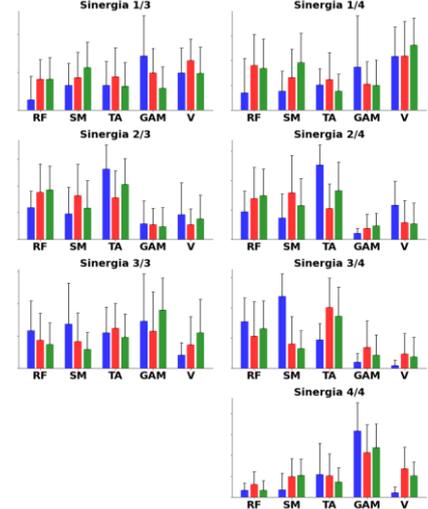
Analizando los resultados de la cinemática de la rodilla, observamos que se ven mejoras en la flexión-extensión de la articulación de niños con PC luego de una RDS, independientemente de la técnica quirúrgica implementada.

Grupo	Número de sinergias		
	2	3	4
Control	-	25%	75%
Pre	46,42%	35,71%	17,86%
Post Conservadora	35,29%	29,41%	35,29%

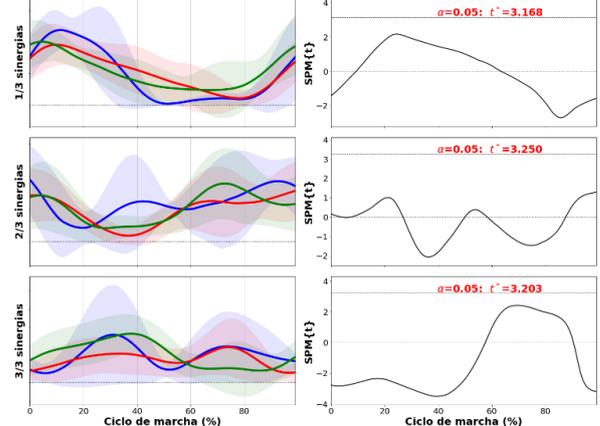
Tabla 1. Porcentaje de participantes que para cada grado de sinergia explican el 80% VAF.



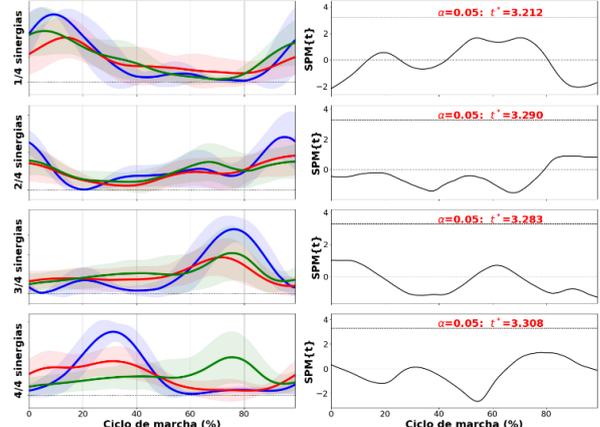
a) Variación total explicada por 7 sinergias



b) Pesos musculares para 3 y 4 sinergias



c) Activaciones y Prueba T Pareada para 3 Sinergias



d) Activaciones y Prueba T Pareada para 4 Sinergias

Fig. 2: Pesos musculares y activaciones obtenidas con diferentes grados de sinergias para los grupos de control (azul), Pre (rojo) y Post conservadora (verde). a) Promedio y desvío estándar de la VAF explicada por hasta 7 sinergias. b) Promedio y desvío estándar de los pesos musculares para 3 y 4 sinergias. c) Promedio y desvío estándar de las activaciones musculares para 3 y 4 sinergias (lado izquierdo) y la prueba t pareada con una significancia del 95% entre los grupos Pre y Post conservadora (del lado derecho).

Sin embargo, los niños en que se utilizó la técnica conservadora las mejoras fueron mayores. Mostrando valores de flexión-extensión de rodilla más cercanos a niños sin patologías en la marcha y un mayor rango de movimiento articular (ver Fig. 1). Este comportamiento concuerda con lo expresado por otros autores [8].

Al igual que los resultados de Steele et al. (2015) y Shuman et al. (2019), nuestros resultados muestran que menos sinergias son requeridas para describir la variación de la actividad muscular durante la marcha en individuos con PC en comparación con niños sin patologías (Fig 2a)). Demostrando de manera consistente que personas con lesiones neurológicas utilizan una estrategia de control simplificada en comparación con niños sin patologías durante la marcha [9]. Por otro lado, no se observan modificaciones significativas en la varianza total explicada de la actividad muscular luego de la RDS y la consecuente rehabilitación, a pesar de los cambios favorables en el movimiento articular de la rodilla de los niños con PC. Esto puede deberse a que los tratamientos tienen un impacto mínimo en las estrategias subyacentes que un individuo utiliza para controlar y coordinar sus músculos, sugiriendo que el control motor es relativamente invariante en la PC [10].

En los resultados publicados por Shuman et al. se destacó un cambio mínimo, pero significativo, en la variabilidad de la actividad muscular explicada por 1 sinergia (tVAF1) en sujetos sometidos a RDS. Sin embargo, este cambio fue en la dirección opuesta a la deseada: VAF 1 aumentó, creando una brecha más amplia entre los individuos con PC y los no patológicos. La RDS bloquea señales procedentes del sistema nervioso, lo cual podría ser una explicación para la reducción de la complejidad sinérgica. Lo mismo sucedió en los resultados que se obtuvieron en este trabajo, como puede observarse en la figura 2a.

Shuman et al. encontraron que los pesos musculares no cambiaron luego de la cirugía y consecuente rehabilitación. Los resultados encontrados no contradicen dichos hallazgos. Esto quiere decir que los mismos grupos musculares parecen activarse en los distintos grupos de estudio.

Recordando que la RDS consiste en la sección selectiva de las raíces nerviosas dorsales en la médula espinal y que las sinergias musculares están estructuradas en el tronco cerebral o la médula espinal. Resulta esperable que luego de la cirugía las sinergias no hayan experimentado cambios significativos. Sin embargo, esto no explica por qué la rehabilitación posterior a la cirugía no tiene un impacto en las estructuras de sinergias.

Si consideramos que la etapa de desarrollo de los patrones motores, desde el recién nacido hasta la edad de los niños pequeños, se debe principalmente a la adición de nuevos patrones a los pocos patrones básicos presentes al nacer. Esta adición progresiva y de ajuste fino de elementos motores podría reflejar cómo un bebé, en su camino hacia la locomoción bípeda, aprende nuevas sinergias musculares [5]. En este punto, niños con PC tienen sinergias musculares similares a las de neonatos o niños pequeños [10]. Teniendo en cuenta que los niños con PC tienen un tono muscular aumentado, es factible pensar que esto limite su capacidad de aprender nuevas sinergias. Una posible razón es que el proceso de maduración alterado del cerebro y las vías

descendentes pueden limitar la plasticidad neural. Una reducción en la plasticidad neural podría explicar la ausencia de cambios en las sinergias observados luego de una RDS (ver Fig. 2) [10]. Otra posibilidad es que el tiempo requerido por el sistema nervioso central para adquirir nuevas sinergias sea mayor al tiempo luego de la cirugía en el que se realizó este estudio.

## V. CONCLUSIONES

Los niños con PC, antes y después de la RDS y consecuente rehabilitación, tienen sinergias similares y de menor complejidad a las de sus pares de control. Esto se refleja en un control neuromuscular más simplificado, teniendo efectos negativos sobre la marcha. A pesar de esto, la RDS mejora la marcha de los niños con PC, como se mostró con los ángulos de flexión de rodilla. Finalmente, lograr comprender los mecanismos mediante los cuales se estructuran o modifican las sinergias musculares podría abrir nuevos caminos en la búsqueda de mejores tratamientos que permitan readecuar las estrategias de control neuromuscular llevadas adelante por niños con PC.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el soporte parcial de la Universidad Nacional de Entre Ríos mediante el PUIDT-UNER 6206, FONCyT mediante el PICT 2019-02459 y CONICET mediante el PIBAA 0814.

## REFERENCIAS

- [1] K. Kleinstueber Saa, M. de los Á. Avaria Benaprés, y X. Varela Estrada, «Parálisis Cerebral», *Revista Pediatría Electrónica, Universidad de Chile, Facultad de Medicina, Departamento de Pediatría y Cirugía Infantil*, 2014.
- [2] J. Gage, M. Schwartz, S. Koop, y T. Novacheck, *Identification and Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy*, 2.ª ed. en *Clinics in Developmental Medicine*. 2009.
- [3] S. A. Safavynia, G. Torres-Oviedo, y L. H. Ting, «Muscle Synergies: Implications for Clinical Evaluation and Rehabilitation of Movement», *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, vol. 17, n.º 1, pp. 16-24, 2011, doi: 10.1310/sci1701-16.
- [4] K. M. Steele, A. Rozumalski, y M. H. Schwartz, «Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy», *Dev Med Child Neurol*, vol. 57, n.º 12, pp. 1176-1182, 2015, doi: 10.1111/dmcn.12826.
- [5] E. Bizzi y V. C. K. Cheung, «The neural origin of muscle synergies», *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 7, 2013, doi: 10.3389/fncom.2013.00051.
- [6] A. J. Meyer, I. Eskinazi, J. N. Jackson, A. V. Rao, C. Patten, y B. J. Fregly, «Muscle Synergies Facilitate Computational Prediction of Subject-Specific Walking Motions», *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 4, 2016, doi: 10.3389/fbioe.2016.00077.
- [7] B. Mantese, C. G. Pirozzi Chuisa, Y. Basilotta Márquez, M. P. Gotter Campo, R. Nazar, M. Crespo, A. Toledo, E. Ravera, «Selective Dorsal Rhizotomy: Analysis of two rootlet sectioning techniques», *Research Square*, 2023.
- [8] B. P.-J. Chen, K. K. Wang, y T. F. Novacheck, «Selective Dorsal Rhizotomy for the Treatment of Gait Dysfunction in Cerebral Palsy: A Critical Analysis Review», *JBJS Rev*, vol. 7, n.º 11, p. e3, 2019, doi: 10.2106/JBJS.RVW.19.00020.
- [9] M. H. Schwartz, A. Rozumalski, y K. M. Steele, «Dynamic motor control is associated with treatment outcomes for children with cerebral palsy», *Dev Med Child Neurol*, vol. 58, n.º 11, pp. 1139-1145, 2016, doi: 10.1111/dmcn.13126.
- [10] B. R. Shuman, M. Goudriaan, K. Desloovere, M. H. Schwartz, y K. M. Steele, «Muscle synergies demonstrate only minimal changes after treatment in cerebral palsy», *J NeuroEngineering Rehabil*, vol. 16, n.º 1, p. 46, 2019, doi: 10.1186/s12984-019-0502-3.