DEDUCCIÓN DE INDICADORES QUE PERMITEN CLASIFICAR OBJETIVAMENTE LA MARCHA HEMIPLÉJICA ESPÁSTICA

UBALDO RAFAEL PADILLA LIENDO

RESUMEN

La hemiplejia es una disfunción motora con implicaciones neuromusculares de predominio unilateral corporal y alteraciones en la marcha. Su análisis e interpretación involucra un equipo multidisciplinario. Los especialistas o expertos: médicos traumatólogos, fisioterapeutas e ingenieros biomédicos, analizan las curvas cinemáticas para clasificar al paciente en uno de los grupos hemipléjicos propuesto por Gage. La clasificación es empírica por depender de la experiencia, errores, aciertos del especialista, y subjetiva porque su análisis es el resultado de comparar curvas y rangos articulares. El presente estudio pretende identificar los indicadores utilizados por los especialistas, para clasificar el tipo de hemiplejia al que pertenece un grupo de registros previamente clasificados. Al azar fueron seleccionados 24 registros de una muestra de 186 pacientes, obtenidos en el Laboratorio de Marcha del Hospital Ortopédico Infantil de Caracas, Venezuela. La metodología empleada es la triangulación de los análisis realizados para clasificar y validar los errores o aciertos del experto, durante el proceso de interpretación. Se obtiene una sensibilidad de 100% que permite diferenciar los pacientes tipo 1, 67% para los de tipo 2, 50% para el tipo 3 y 83% para el tipo 4. Los indicadores son expresados mediante un lenguaje conocido por los especialistas, modelados mediante un algoritmo coherente al procedimiento de análisis de distal a proximal, capaz de describir con precisión la marcha hemipléjica. Los resultados de sensibilidad infieren un apropiado diagnóstico del modelado que asegura un tratamiento adecuado al tipo de hemiplejia.

El análisis clínico de la marcha (ACM) es una serie de estudios cuantitativos y cualitativos, realizados en el laboratorio de marcha para confirmar o descartar un diagnóstico del especialista. La Figura 1 describe el ACM en tres dimensiones, cada plano proyectado por separado como una combinada de una imagen compuesta y sus parámetros son expresados en el sistema de coordenada tridimensional XYZ (Dao *et al*., 2011).

La biomecánica de la marcha normal es descrita en las articulaciones del miembro inferior: tobillo, rodilla, cadera y pelvis (Moreno *et al*., 2008; Winter, 2009). El modelado biomecánico es creado uniendo las principales articulaciones mediante segmentos, para lo cual el Laboratorio de Marcha del Hospital Ortopédico Infantil de Caracas, Venezuela, emplea el protocolo de Davis *et al*. (1999), utilizando marcadores ópticos colocados en los puntos óseos anatómicos más prominentes de ambos miembros inferiores, tal como es ilustrado en la Figura 2: espina iliaca antero superior (EIAS), trocánter mayor, cóndilo femoral lateral, cabeza del peroné, maléolo lateral, cabeza del quinto metatarsiano, séptima vértebra cervical, primera vértebra sacra y los calcáneos (Vannozzi *et al*., 2004).

La cinemática analiza el movimiento sin importar las causas, se expresa en ángulos y rotaciones articulares sobre el plano coronal, sagital y transverso (Ríos, 2007). La luz infrarroja reflejada en los marcadores ópticos es capturada por las cámaras de emisión, y el sistema VICON 370 (Vicon, 2013) genera el modelado biomecánico que describe el movimiento mediante su cinemática (Vaughan, 1999).

Terminología utilizada en el análisis de la marcha

Un ciclo de marcha (CM) normal ocurre entre el contacto inicial (CI) del talón del pie, hasta el siguiente CI del mismo talón. El CM se divide en fase de apoyo (FA) y fase de balanceo (FB). La FA comienza con el CI del talón y finaliza con el despegue de

PALABRAS CLAVE / Análisis de Marcha / Clasificación Hemipléjica / Hemiplejia Espástica / Indicadores Hemipléjicos / Parálisis Cerebral /

Recibido: 08/03/2013. Modificado: 05/02/2014. Aceptado: 12/02/2014.

Ubaldo Rafael Padilla Liendo. M.Sc. en Ingeniería Biomédica, Universidad Simón Bolívar (USB), Venezuela. Profesor-Investigador, USB, Venezuela. Dirección: Departamento de Tecnología Industrial, USB. Camurí Grande, Estado Vargas, Apartado Postal 89000, Venezuela. e-mail: ubaldorpl@usb.ve

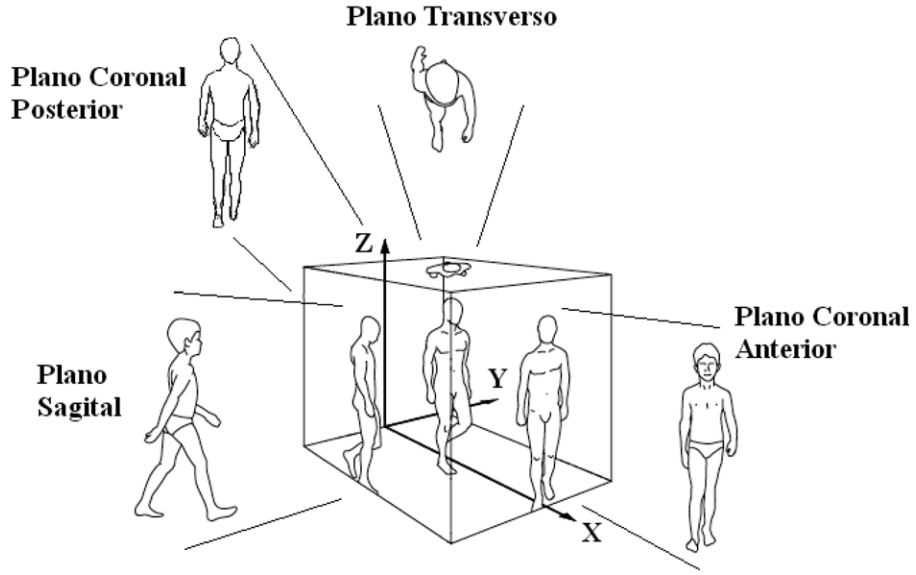

Figura 1. La marcha de un niño proyectada en los tres planos ortogonales (Dao *et al*., 2011).

los dedos, momento en que inicia la FB, período transcurrido desde el despegue de los dedos hasta que el mismo pie toca el suelo nuevamente, la FA presenta cinco eventos y la FB tiene tres, como se puede apreciar en la Figura 3 (Perry, 2010).

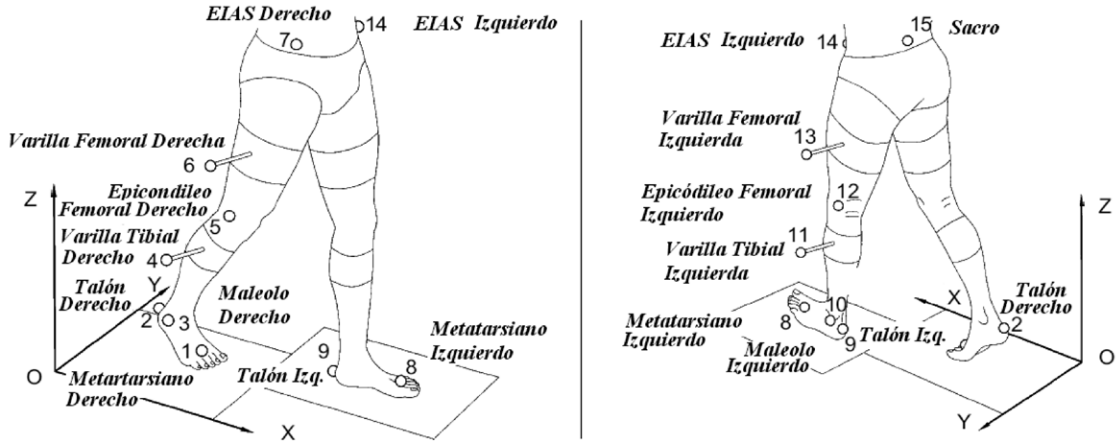

Figura 2. Marcadores ópticos en ambos miembros inferiores (Vannozzi *et al*., 2004).

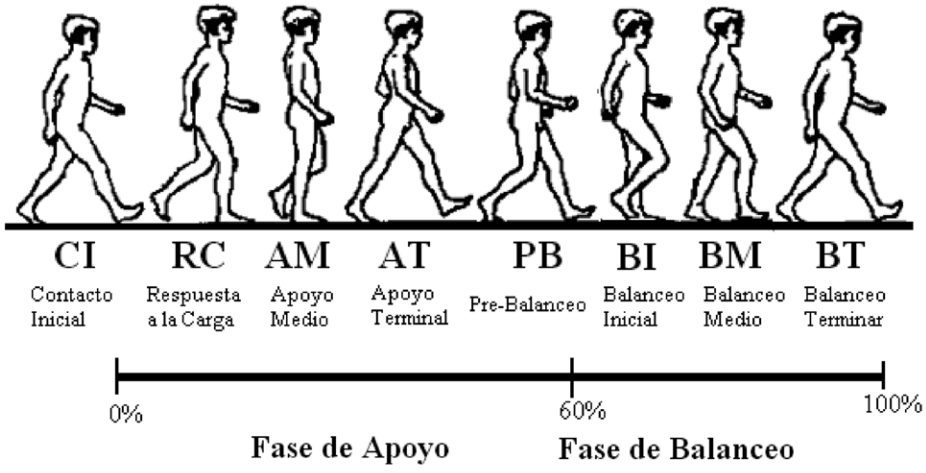

Figura 3. Fases del ciclo de marcha (Perry, 2010).

Eventos apreciados en la FA de la marcha normal

El CI ocurre en el intervalo de 0-2% del CM y se aprecia a ambos pies en contacto con el suelo. El choque del talón crea una fuerza de reacción del suelo (FRS). La respuesta a la carga (RC) se produce en el intervalo de 0-10%, la planta del pie tocando completamente el suelo. La desaceleración y absorción del impacto ocurre por la transferencia del peso de un lado al otro de la cadera. Durante el apoyo medio (AM), en el intervalo de 10-30%, el pie contralateral está en balanceo y el centro de gravedad está en su punto más alto. El AM mantiene la estabilidad, desacelera el avance tibial con el pie en mecedora. El apoyo terminal (AT) o levantamiento del talón ocurre en el intervalo de 30-50%, y la FRS determina la dirección del momento hacia la rodilla flexionada para incrementar su magnitud antes del levantamiento de los dedos. En el pre-balanceo (PB) en el intervalo 50-60%, se produce el despegue de dedos, las fuerzas mecánicas sobre el tobillo tratan de dorsiflexionarlo, encontrando resistencia por la contracción excéntrica de los músculos gastrocnemios (Perry, 2010).

Eventos considerados en la FB de la marcha normal

El balanceo inicial (BI) ocurre en el intervalo de 60-73% del CM; se inicia con el despegue de dedos, los músculos flexores mantienen neutra la articulación del tobillo y el cuádriceps se contrae para evitar que el talón se levante demasiado. El balanceo medio (BM) acontece en el intervalo de 70-85%, y en condiciones normales debe observarse el paso libre del pie. El balanceo terminal (BT) sucede en el intervalo de 85-100%; en esta fase el pie se prepara adecuadamente para el choque del talón en CI y la actividad muscular se intensifica para mantener flexionada la cadera (Perry, 2010).

Mecedoras del tobillo evaluadas en la FA

Las mecedoras ocurren durante la FA. Estos eventos ayudan a desplazar el cuerpo hacia delante (Perry, 2010). La Figura 4 muestra los tres tipos

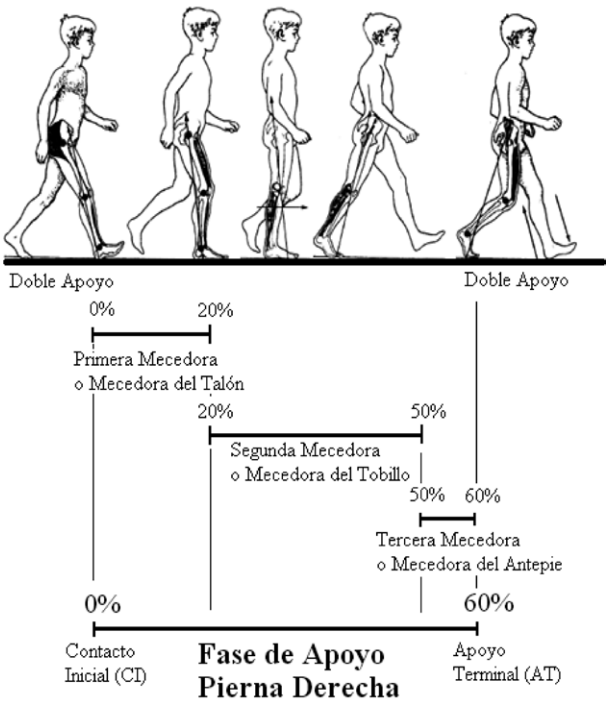

Figura 4. Mecedoras del tobillo en la fase de apoyo (Perry, 2010).

de mecedoras: 1) La primera mecedora o choque del talón, sucede entre 0 y 20% del CM, el músculo tibial anterior restringe la flexión plantar y el avance anterior de la tibia, mientras que los cuádriceps influyen en el avance del fémur sobre la tibia. 2) La segunda o mecedora de tobillo acontece entre 20 y 50% del CM, interviene el sóleo para la desaceleración y progresión de la tibia sobre el pie estacionario. 3) La tercera mecedora o levantamiento del talón, ocurre entre 50 y 60% del CM, en ella intervienen los gastrocnemios y el sóleo para la desaceleración y propulsión tibial.

Rangos articulares del miembro inferior evaluados en el plano sagital

1– La articulación del tobillo es el ángulo medido entre el eje mayor de la pierna y el segmento plantar del pie, según Posadas *et al*. (2000). En la Figura 5 se aprecia dos clases de articulación del tobillo: a) dorsiflexión, la flexión del pie hacia el tobillo, llevándolo hacia arriba; y b) flexión plantar, la acción de estirar el pie y moverlo hacia abajo con el eje de rotación en el tobillo.

2– La rodilla realiza dos movimientos articulares, flexión y extensión. La Figura 6 describe esta medida como el ángulo entre la prolongación del eje mayor del muslo y el eje mayor de la pierna, según Posadas *et al*. (2000). Estos movimientos son: a) Flexión de rodilla: cuando el ángulo articular entre el segmento del muslo y el de la pierna disminuye. b) Extensión de rodilla, el enderezamiento entre el segmento del muslo y el de la pierna, en el cual ambos huesos se alinean paralelamente. c) Hiperextensión de la rodilla, que acontece cuando el ángulo posterior de la articulación tiene extensión neutral excesiva, también conocido como *genu recurvatum*.

3– Los movimientos articulares de la cadera son flexión y extensión. La Figura 7 muestra que su medida está determinada por el ángulo entre una línea perpendicular al plano transverso de la pelvis y el eje mayor del muslo, ambas líneas son proyectadas sobre la pelvis en el plano sagital (Posadas *et al*., 2000). Estos movimientos son: a) Flexión de cadera, cuando el ángulo entre el eje mayor del muslo y la línea perpendicular al plano transverso de la pelvis aumenta. b) Extensión de cadera, en el instante en que el eje mayor del muslo y la línea perpendicular al plano transverso de la pelvis se alinean paralelamente. c) Hiperextensión de cadera, donde el ángulo posterior de la articulación muestra extensión neutral excesiva.

4– Los movimientos articulares de la pelvis se describen en la Figura 8, como el ángulo entre dos líneas imaginarias, una línea horizontal paralela a la línea de progresión, y la otra es la línea que conecta la espina ilíaca antero superior (EIAS) con la espina ilíaca postero superior (EIPS), según Rupcich *et al*. (2008). Los movimientos son: a) Inclinación pélvica, el incremento en el sentido horario del ángulo entre la línea horizontal y la línea que une las espinas ilíacas EIAS con la EIPS. b) Lordosis lumbar, el incremento excesivo del ángulo de inclinación pélvica, según Salazar *et al*. (2011).

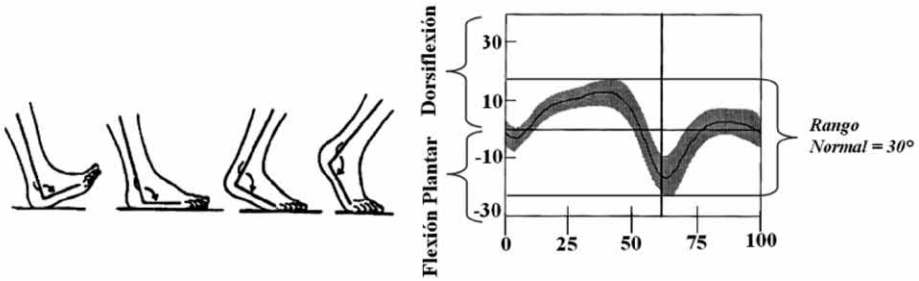

Figura 5. Rango articular del tobillo en el plano sagital (Gage *et al*., 2011).

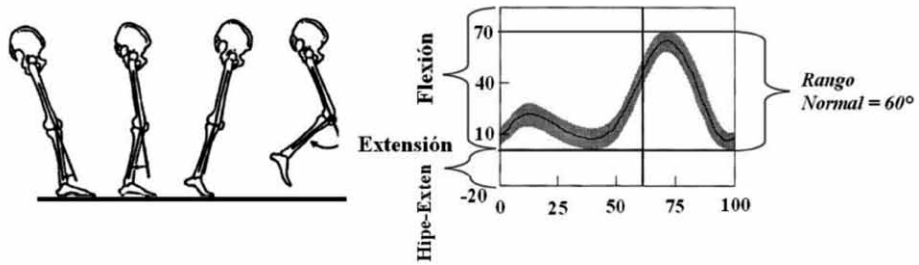

Figura 6. Rango articular de la rodilla en el plano sagital (Gage *et al*., 2011).

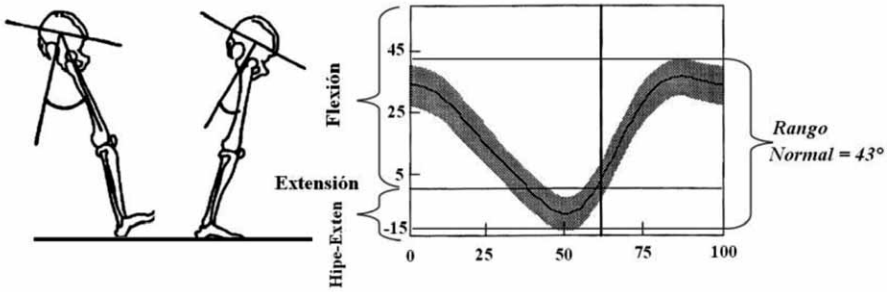

Figura 7. Rango articular de la cadera en el plano sagital (Gage *et al*., 2011).

Hemiplejia espástica (HE)

La HE es una patología compleja para la cirugía ortopédica pediátrica (Dobson *et al*., 2007). Se caracteriza por una alteración neuronal músculoesquelética predominantemente en un lado del cuerpo, originando disfuncionalidad de la marcha. Gage (1991) describe y clasifica la marcha HE en términos del miembro inferior afectado, analiza los registros cinemáticos en el plano sagital, a partir de los patrones homogéneos obtenidos por Winters *et al*. (1987), correlacionándolos con los datos electromiográficos de activación muscular de la pierna afectada. La Figura 9 muestra los patrones por articulación. Estudios anteriores han relacionado los registros cinemáticos con los registros electromiográficos de activación muscular de la pierna hemipléjica (Moreno *et al*., 2008).

Dao *et al*. (2011) estudia y confronta dos métodos de modelización desde el punto de vista clínico: entender el cuerpo humano como un sistema simplificado en la toma de decisiones médicas mediante un modelo biomecánico basado en las geometrías anatómicas, datos antropométricos, propiedades mecánicas o dinámica del sujeto durante la marcha, y otro modelo que recoge los datos cinemáticas: cinética y señales electromiográficas del movimiento. Aguilera *et al*. (2009) ofrece un aporte importante para tratar casos complejos, cuando es difícil establecer satisfactoriamente un diagnóstico médico, por lo que es necesario coordinar un modelo basado en la colaboración de un equipo médico, para analizar los resultados de interpretación del grupo de especialistas durante el diagnóstico. Watelain (1999), analiza las circunstancias que enfrentan los especialistas para tomar decisiones a partir de interpretaciones y análisis de los registros del movimiento. Las restricciones a estos modelos depende del razonamiento inductivo, el deductivo, creencias o conjeturas y limitaciones de los usuarios para aplicar métodos de aproximación objetivas, como modelos matemáticos, estadísticos, máquina de soporte vectorial y redes neurales.

Cuadros Clínicos

Clínicamente la marcha normal presenta cinco características principales: estabilidad en la fase de apoyo, paso libre del pie en balanceo, preparación adecuada del pie en contacto inicial, longitud adecuada del paso y conservación de la energía (Watelain *et al*., 2005). Estas características se encuentran seriamente comprometidas en la marcha de un paciente hemipléjico secuela de parálisis cerebral, lo que implica un desorden del movimiento ocasionado por una lesión no progresiva del cerebro inmaduro (encefalopatía estática), resultando una patología músculoesquelética en evolución (Riad *et al*., 2007). Las etiologías en recién nacidos son el infarto hemorrágico periventricular, lesión arterial oclusiva focal o el infarto isquémico. En un paciente HE, la lesión afecta cara, brazo y miembro inferior de un mismo lado del cuerpo.

El cuadro clínico para el patrón de HE tipo 1 es: tobillo en flexión plantar reductible durante el apoyo y pie equino en balanceo dificultando el paso libre del pie. El cuadro clínico para el patrón HE tipo 2 es: flexión plantar de tobillo irreductible durante todo el apoyo, inestabilidad en apoyo y dificultad con el equilibrio en balanceo. Para el patrón HE tipo 3: compromiso del tobillo igual que el tipo 2 más disminución del rango de movilidad de la rodilla y aumento de la rigidez muscular. Para el patrón HE tipo 4: el mismo compromiso del Tipo 2 y 3 más disminución del rango de movimiento de la cadera, rigidez y espasmos musculares más severos.

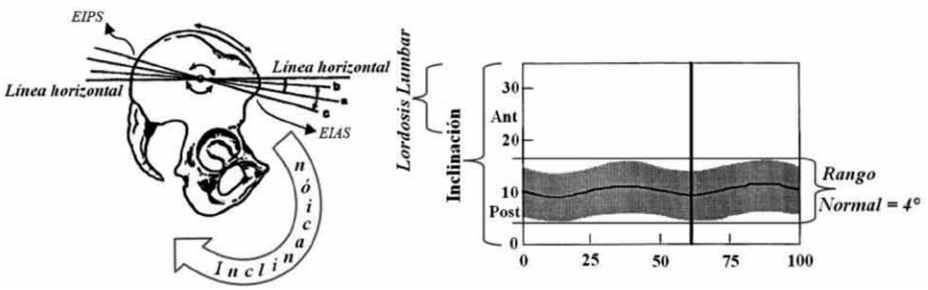

Figura 8. Rango articular de la pelvis en el plano sagital (Gage *et al*., 2011).

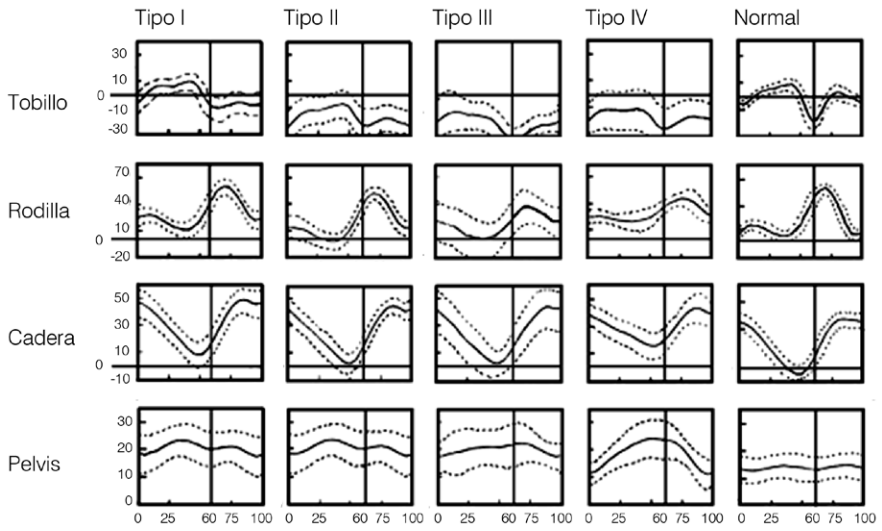

Figura 9. Patrones cinemáticos plano sagital de la HE (Winters *et al*., 1987).

Formulación del Problema

La clasificación del paciente en cada uno de los cuatro patrones de HE es empírico y subjetivo (McDowell *et al*., 2008). Empírico porque influye la experiencia, errores y aciertos del especialista. Subjetivo debido a que la interpretación de los registros cinemáticos es analizado cualitativamente, comparando las curvas cinemáticas del paciente con los patrones de marcha normal y los cuatro patrones HE establecidos. La subjetividad en la interpretación introduce un alto grado de incertidumbre para clasificar correctamente a un paciente HE.

Es posible obtener indicadores significativos, extraídos de los propios especialistas durante el análisis de los registros cinemáticos de la marcha, para clasificar objetivamente a un paciente HE, con la finalidad de generar un diagnóstico apropiado para un tratamiento efectivo. Clasificar con precisión el tipo de HE significa utilizar los indicadores correctos durante el ACM, que garanticen mínima incertidumbre en la interpretación e inferir cuales son los grupos musculares afectados que limitan la movilidad. Esta investigación es inédita por in-

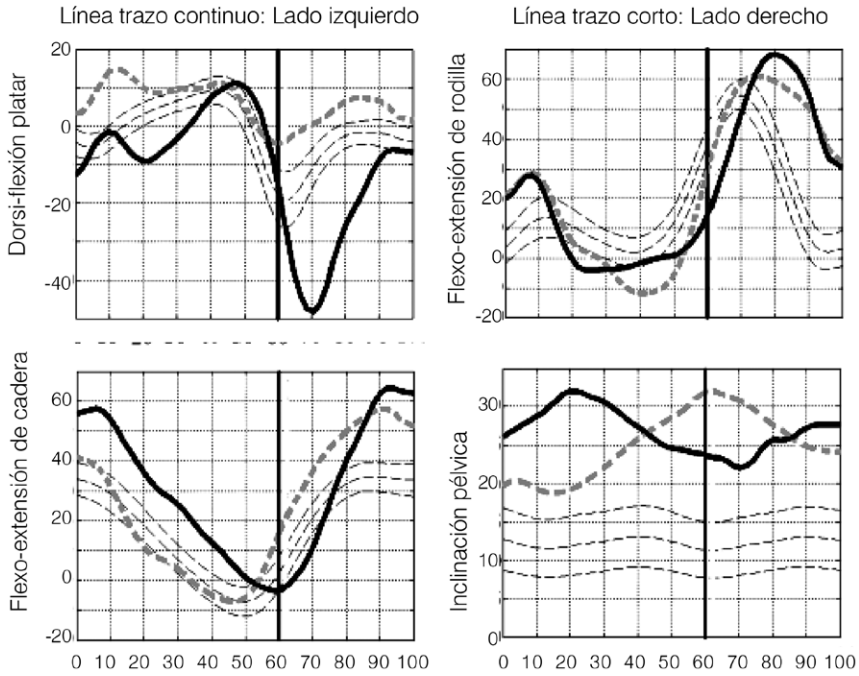

Figura 10. Reporte cinemáticos de las articulaciones de un paciente hemipléjico.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA HEMIPLEJIA ESPÁSTICA TIPO 1

Pruebas	Diagnóstico previo	MT-A	MT-B	IB	F
ID338_14	Tipo 1	Tobillo Pie equino o en flexión plantar: FB 62-100% Ausencia de la primera mecedora choque del talón: dorsiflexión plantar CI 0-2% FA 0-62%	Tobillo Pie equino o en flexión plantar: FB 62-100% Ausencia de la primera mecedora choque del talón: dorsiflexión plantar CI 0-2% FA 0-62%	Tobillo Pie en flexión plantar: dorsiflexión plantar FB 62-100% Rodilla Incremento de la flexión BT 85-100% Cadera Incremento de la flexión de cadera AT 30-50% FB 62-100%	Tobillo Pie en flexión plantar: dorsiflexión plantar FB 62-100% Ausencia de la primera mecedora choque del talón: dorsiflexión plantar CI 0-2% Rodilla Incremento de la flexión BT 85-100% Pelvis Leve incremento de la inclinación pélvica FA 0-62% FB 62-100%
ID338_20					
ID365_17					
ID365_19					
ID462_03					
ID514_03					

MT-A: médico traumatólogo A, MT-B: médico traumatólogo B, IB: ingeniero biomédico, F: fisioterapeuta.

corporar la interpretación de los especialistas en el análisis de marcha HE y extraer los indicadores relevantes y coherentes con el lenguaje manejado por ellos.

Este estudio pretende determinar cuáles son los indicadores cinemáticos que permiten analizar, interpretar y clasificar clínicamente con precisión la marcha hemipléjica. Por ello es importante seguir secuencialmente los siguientes pasos: 1) Recopilar los registros con las curvas cinemáticas de pacientes previamente clasificados por los especialistas en uno de los tipos de HE propuestos por Gage. 2) Seleccionar al azar seis reportes cinemáticos de pacientes por cada tipo de HE. 3) Suministrar copia de los seis reportes a los especialistas del laboratorio de marcha (dos médicos traumatólogos (MT), un fisioterapeuta (F) y un ingeniero biomédico (IB) para su análisis e interpretación, sin que ellos conozcan a priori el tipo de HE al que pertenecen. 4) Sintetizar las estrategias de interpretación de los especialistas sobre los registros cinemáticos. 5) Validar la clasificación de los especialistas en función de acertar correctamente el tipo de HE del paciente. 6) Cotejar el análisis de interpretación de cada uno de los especialistas y extraer los indicadores frecuentemente utilizados por los especialistas. 7) Diseñar un algoritmo de clasificación utilizando los indicadores extraídos durante el análisis e interpretación de los especialistas.

Materiales y Métodos

Se procesó una muestra de 186 pacientes en edades entre 4 y 16 años, con diagnóstico de hemiplejia espástica secuela de parálisis cerebral infantil y evidente trastorno de marcha patológica. Cada paciente proporciona tres registros cinemáticos en formato GCD (*gait cycle data*) utilizando el sistema VICON 370(Vicon, 2013), obtenidos entre los años 1999 y 2009 en el laboratorio de marcha del Hospital Ortopédico Infantil, Caracas, Venezuela. El protocolo de Davis *et al*. (1999) es utilizado como parámetro fundamental en la colocación de los marcadores ópticos en los puntos óseos más prominentes de ambos miembros inferiores del paciente, para obtener el modelo biomecánico que describe la cinemática de la marcha. Los pacientes fueron previamente clasificados por los especialistas utilizando los patrones propuestos por Gage (1991), resultando en 76 pacientes HE tipo 1, 35 del tipo 2, 23 para el tipo 3 y 52 tipo 4.

Los registros GCD adquiridos a través del sistema VICON 370, fueron procesados utilizando Microsoft office EXCEL 2010. Se diseñó un reporte con las curvas cinemáticas en el plano sagital de las principales articulaciones de ambos miembros inferiores (tobillo, rodilla, cadera y pelvis). La Figura 10 ilustra en línea gruesa continua para la pierna izquierda, afectada por la hemiplejia, y línea gruesa a trazo discontinuo para la pierna contralateral derecha no afectada, con evidentes movimientos compensatorios. En la misma gráfica se dibuja solapada la curva promediada del patrón normal de la articulación.

Se seleccionó al azar seis reportes de pacientes por cada tipo de HE, para un total de 24 reportes. Se entregó un duplicado de los 24 reportes a los especialistas, quienes según su criterio de análisis e interpretación clasifican cada uno de casos. Se extrajo los indica-

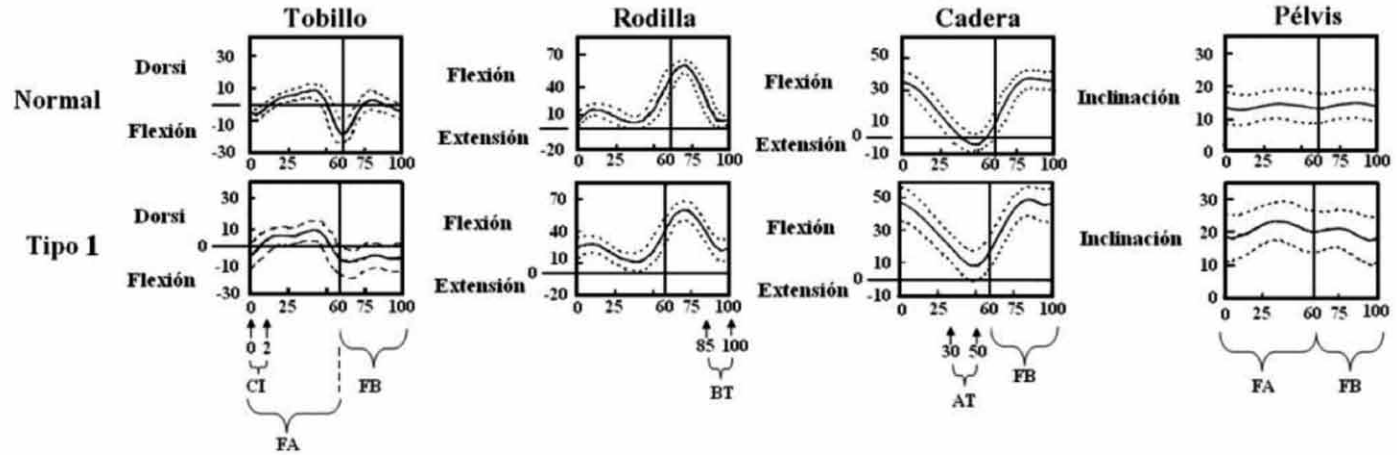

Figura 11. Indicadores significativos utilizados para describir la HE tipo I.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LA HEMIPLEJIA ESPÁSTICA TIPO 2

Pruebas	Diagnóstico previo	MT-A	MT-B	IB	F
ID386_05	Tipo 2	Tobillo Pie equino o flexión plantar: FA 0-62% FB 62-100% Rodilla Hiperextensión: AT 30-50%	Tobillo Pie equino o flexión plantar: FA 0-62% FB 62-100% Rodilla Hiperextensión: AT 30-50%	Tobillo Pie equino o flexión plantar: FA 0-62% FB 62-100% Rodilla Hiperextensión: AT 30-50% PB 50-60% Cadera Hiperextensión AT 30-50%	Tobillo Pie equino o flexión plantar: FA 0-62% FB 62-100% Ausencia de la tercera mecedora o levantamiento del talón: AT 30-50% Rodilla Hiperextensión *Genurecurvatum*: AT 30-50% PB 50-60% Pelvis Ligero incremento de la inclinación pélvica lordosis lumbar: FA 0-62% FB 62-100%
ID386_08					
ID417_08					
ID417_11					
ID486_17					
ID584_04					

MT-A: médico traumatólogo A, MT-B: médico traumatólogo B, IB: ingeniero biomédico, F: fisioterapeuta.

dores frecuentemente utilizados, mediante la triangulación de los análisis de los especialistas para clasificar acertadamente. La validación de los indicadores se midió en función de los errores o falsos negativos, y aciertos o verdaderos positivos, expresados como la sensibilidad para una correcta clasificación. Se construyó un algoritmo de clasificación utilizando los indicadores extraídos durante el análisis.

Resultados

Los especialistas analizaron los registros cinemáticos basado en los rangos articulares del miembro inferior afectado por la hemiplejia, desde distal a proximal, comenzando en el tobillo, luego rodilla, seguido por cadera y ultimo pelvis.

En la Tabla I la flexión plantar en FB y ausencia del choque del talón en CI, es decisiva para los MT al clasificar la HE tipo1; no observan desviaciones significativas en las demás articulaciones. El IB visualiza un declive de la curva cinemática del tobillo en FB y un ligero ascenso de la curva cinemática en rodilla en BT; al igual en cadera en AT y

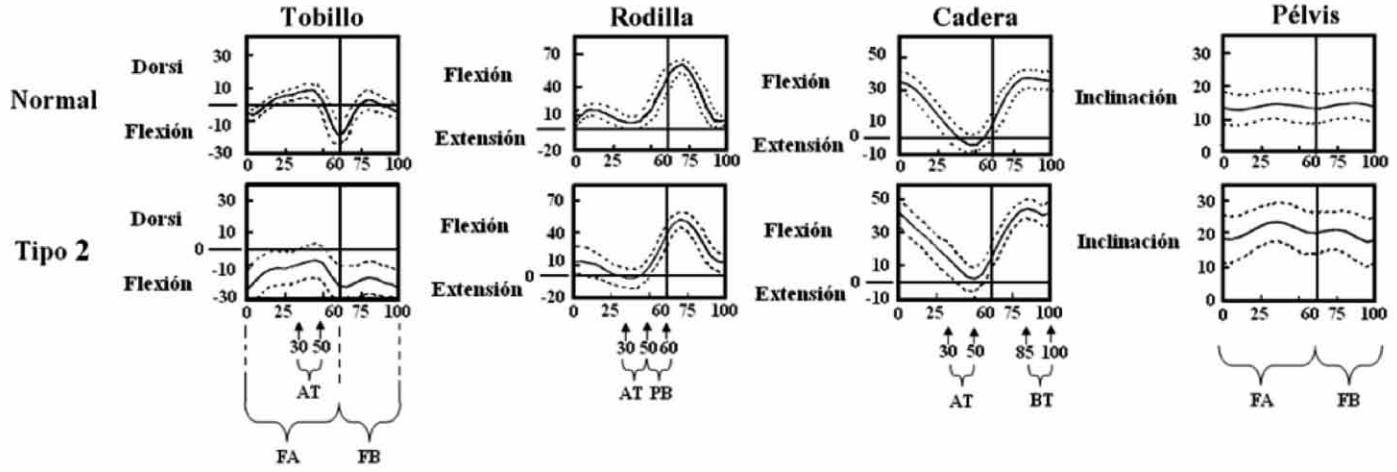

Figura 12. Principales indicadores utilizados para analizar la HE tipo II.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LA HEMIPLEJIA ESPÁSTICA TIPO 3

Pruebas	Diagnóstico previo	MT-A	MT-B	IB	F
	Tipo 3	Tobillo	Tobillo	Tobillo	Tobillo
ID524_06		Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:	Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:	Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:	Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:
ID524_08		FA 0-62%	FA 0-62%	FA 0-62%	FA 0-62%
		FB 62-100%	FB 62-100%	FB 62-100%	FB 62-100%
ID534_07		Ausencia de mecedora:	Ausencia de mecedora:	Ausencia de mecedora:	Ausencia de mecedora:
		FA 0-62%	FA 0-62%	FA 0-62%	FA 0-62%
		Rodilla	Rodilla	Rodilla	Rodilla
ID534_09		Limitada flexión:	Limitada flexión:	Limitada flexión:	Limitada flexión:
		FB 62-100%	FB 62-100%	FB 62-100%	FB 62-100%
		Pelvis	Pelvis	Cadera	Cadera
ID649_05		Aumento de la inclinación pélvica lordosis lumbar:	Aumento de la inclinación pélvica lordosis lumbar:	Incremento del rango flexo-extensión:	Circonducción de cadera en el plano transverso rotación:
		FA 0-62%	FA 0-62%	BT 85-100%	FB 62-100%
		FB 62-100%	FB 62-100%	Pelvis	Incremento del rango flexo-extensión:
				Aumento de la inclinación pélvica lordosis lumbar:	BT 85-100%
ID718_04				FA 0-62%	Pelvis
				FB 62-100%	Aumento de la inclinación pélvica lordosis lumbar:
					FA 0-62%
					FB 62-100%

MT-A: médico traumatólogo A, MT-B: médico traumatólogo B, IB: ingeniero biomédico, F: fisioterapeuta

FB, se incrementa la flexión en rodilla y cadera para evitar arrastrar el pie en balanceo. El fisioterapeuta mide los rangos de movilidad articular de la pierna hemipléjica del paciente, observa flexión plantar en FB, ausencia de la primera mecedora en CI, leve aumento de la flexión en rodilla; otro indicador apreciado es un ligero incremento de la lordosis lumbar por inclinación pélvica. La Figura 11 sintetiza los indicadores para clasificar la HE tipo 1.

La Tabla II expone los criterios de clasificación de la HE tipo 2, los MT indagan si ocurre flexión plantar en todo el CM, siempre que las demás articulaciones del miembro afectado estén ligeramente dentro de los rangos normales, a pesar de observar una ligera hiperextensión de rodilla en AT. El IB busca un descenso de la curva cinemática del tobillo en todo el CM (FA y FB), verifica leve hiperextensión de rodilla y cadera en AT. El fisioterapeuta (F) confirma pie equino en todo el CM y ausencia de la tercera mecedora en AT, la hiperextensión de rodilla permite observar *genurecurvatum* al final de la FA (AT y PB), un ligero incremento de la inclinación pélvica acentúa la lordosis lumbar en todo el CM. La Figura 12 resume los principales indicadores utilizados para clasificar la HE tipo 2.

La Tabla III describe la HE tipo 3. Los especialistas coinciden en observar flexión plantar en todo el CM y ausencia de mecedoras del pie en la FA. Los MT indagan si existe limitada flexión de rodilla en FB y lordosis lumbar por incremento de la inclinación pélvica. El IB visualiza limitada flexión de rodilla y aumento del rango articular flexo-extensión en cadera en FB incrementándose en BT, aprecia lordosis lumbar por aumento de la inclinación pélvica. F, por su parte, analiza el incremento del rango articular flexo-extensión de cadera en BT. Se exhibe como característica particular de la HE tipo 3, la circonducción de cadera en la FB en el plano transverso, posibilitando la clasificación en otros planos además del sagital, evidenciando la existencia de herramientas adicionales para clasificar la HE (Padilla, 2013). La Figura 13 simplifica los indicadores utilizados en la clasificación de la HE tipo 3.

En la Tabla IV se aprecia coincidencia de todos los especialistas al observar pie equino y restricción en la movilidad de la rodilla en todo el CM, limitada flexo-extensión de cadera y elevada inclinación pélvica con visible lordosis lumbar del paciente. El fisioterapeuta analiza el incremento de la flexión con restricción del movimiento de cadera en BT y restringida movilidad pélvica en todo el CM. La Figura 14 sintetiza los indicadores más trascendentales para describir la HE tipo 4.

En la primera columna de la Tabla V aparecen las identidades de los registros elegidos al azar, analizados por los especialistas. El análisis sobre los registros ayuda a obtener los indicadores que permiten interpretarlos y clasificarlos en uno de

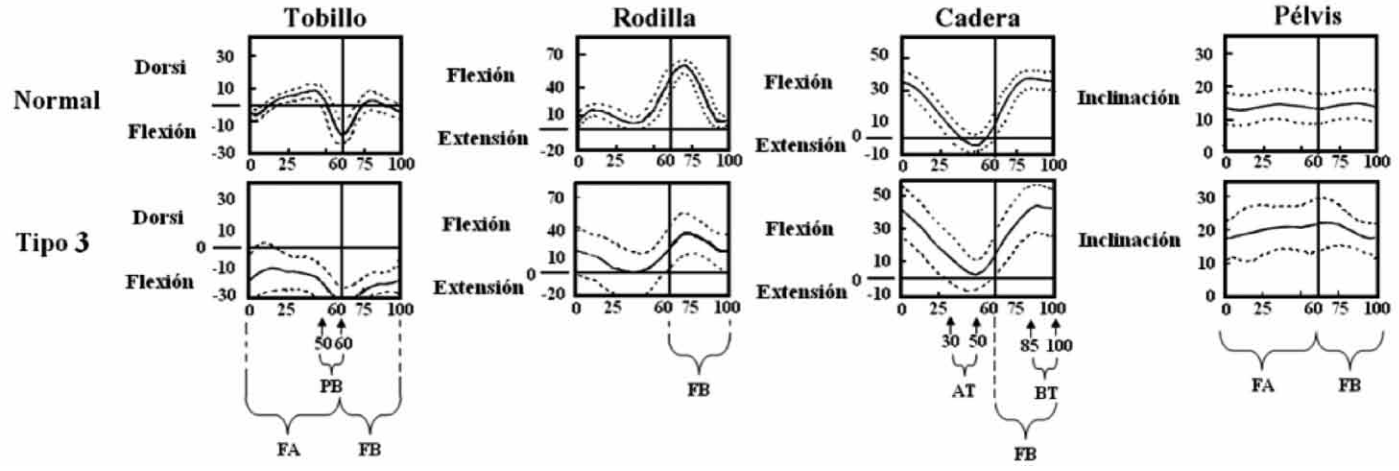

Figura 13. Indicadores importantes para clasificar la HE tipo 3.

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS DE LA HEMIPLEJIA ESPÁSTICA TIPO 4

Pruebas	Diagnóstico previo	MT-A	MT-B	IB	F
	Tipo 4	Tobillo	Tobillo	Tobillo	Tobillo
ID368_06		Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:	Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo:	Pie equino o flexión plantar en todo el ciclo y Restricción del movimiento del tobillo:	Pie equino o flexión plantar:
ID368_11		FA 0-62% FB 62-100%	FA 0-62% FB 62-100%	FB 62-100%	FA 0-62% FB 62-100%
		Rodilla	Rodilla	Rodilla	Rodilla
ID450_10		Limitada flexión: FB 62-100%	Restricción del movimiento FB 62-100% BT 85-100%	Limitada flexión: FB 62-100%	Restricción del movimiento FB 62-100% BT 85-100%
		Cadera	Cadera	Cadera	Cadera
ID504_04		Restricción del movimiento flexo-extensión de cadera: FB 62-100%	Restricción del movimiento flexo-extensión de cadera: FB 62-100%	Restricción del movimiento flexo-extensión de cadera: FB 62-100%	Incremento de la flexión y restricción de movimiento: FB 62-100%
		Pelvis	Pelvis	Incremento de la flexión de cadera: BT 85-100%	Pelvis
ID541_08		Elevada inclinación pélvica lordosis lumbar: FA 0-62%	Elevada inclinación pélvica lordosis lumbar: FA 0-62%	Pelvis	Restricción del movimiento de pélvica lordosis lumbar: FA 0-62%
ID602_03		FB 62-100%	FB 62-100%	Elevada inclinación pélvica lordosis lumbar: FA 0-62% FB 62-100%	FB 62-100%

MT-A: médico traumatólogo A, MT-B: médico traumatólogo B, IB: ingeniero biomédico, F: fisioterapeuta.

los tipos de HE. La columna 'toma de decisión' indica el tipo de HE que mayoritariamente es acertada por los especialistas. La cantidad de instancias clasificadas dentro de la clase a la que realmente pertenecen se indica como 'verdaderos positivos' (Cala, 2010), mientras que la cantidad de instancias que no fueron clasificadas dentro de la clase a la que pertenecen se indica como 'falsos negativos' (Cala, 2010). La 'sensibilidad' es la probabilidad de clasificar correctamente un tipo dado. El modelo tiene 100% de sensibilidad en el caso de los pacientes tipo1, 67% para los del tipo 2, 50% para el tipo 3 y 83% para el tipo 4.

Algoritmo de clasificación en función de los indicadores cinemáticos

El algoritmo de la Figura 15 se construye siguiendo la metodología utilizada por los especialistas, analizando de distal a proximal los registros cinemáticos del plano sagital en las articulaciones del miembro inferior afectado. El algoritmo abre la posibilidad de catalogar un registro como imposible de clasificar, cuando no concuerda con alguno de los patrones HE conocidos.

Discusión

Los especialistas analizaron e interpretaron los registros para finalmente clasificarlos. En algunos casos la clasificación fue errónea originándose los falsos negativos (Cala, 2010), o registros agrupados dentro de un tipo de HE al que no pertenecen. En esta investigación se compilaron solo los indicadores que permitieron al especialista clasificar acertada y correctamente un reporte de curvas cinemáticas, y se rechazaron aquellos análisis e interpretaciones donde la clasificación fue errónea. Los especialistas acertaron completamente al clasificar la HE tipo 1, seguido por el tipo 4 con un 83%, luego el tipo 2 con una posibilidad de acertar de 67%, por último el tipo 3 con un 50% de posibilidades. De los niveles de sensibilidad se infiere que la probabilidad de los especialistas para clasificar correctamente es amplio (Cala, 2010) debido al conocimiento y experiencia que se tiene al interpretarlos diferentes tipos de HE. El algoritmo modela la metodología utilizada por los especialistas, al analizar de distal a proximal las articulaciones del miembro afectado. Los indicadores extraídos poseen un lenguaje conocido por los especialistas y alta precisión al clasificar correctamente la marcha HE, apreciada por la alta sensibilidad para clasificar en comparación con los resultados de otros trabajos de investigación (Dobson *et al*., 2007; Riad *et al*., 2007; Padilla, 2013).

Conclusiones

Los especialistas son asertivos al conocer el tema y dar respuesta veraz para clasificar acertadamente a los pacientes hemipléjicos, con bases cien-

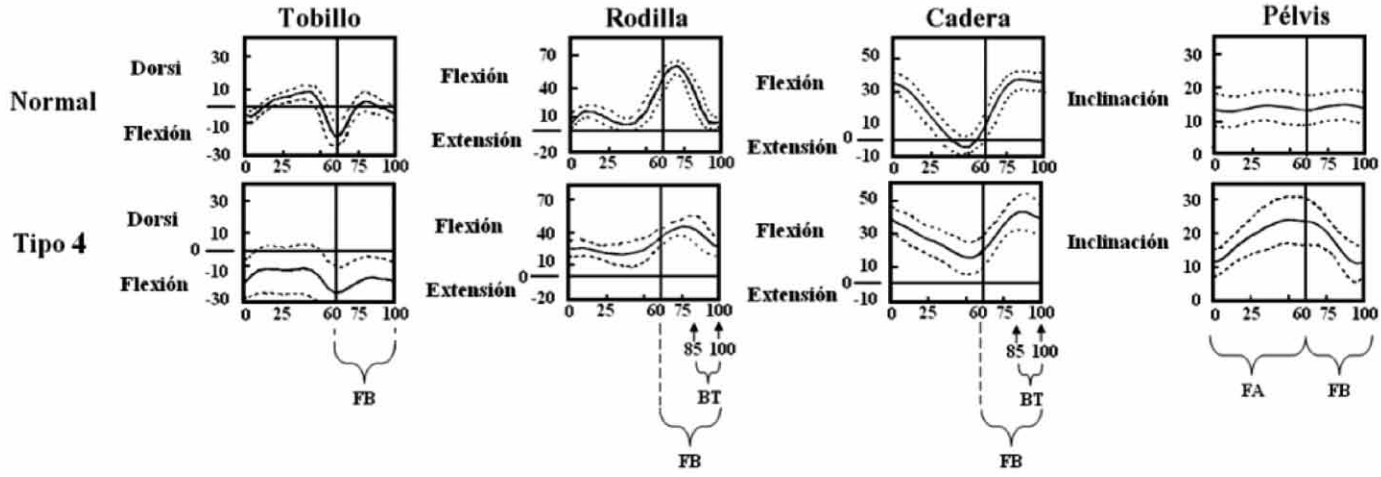

Figura 14. Indicadores importantes para describir la HE tipo 4.

TABLA V
VALIDACIÓN DE LA TOMA DE DECISIÓN DE LOS ESPECIALISTAS

Pruebas	Diagnóstico previo	MT-A	MT-B	IB	F	Toma de decisión	Verdaderos positivos	Falsos negativos	Sensibilidad
ID368_06	Tipo 4	Tipo 4	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 1	*Tipo 1*	5	1	83%
ID368_11		Tipo 3	Tipo 4	Tipo 4	Tipo 2	**Tipo 4**			
ID450_10		Tipo 4	Tipo 4	Tipo1	Tipo 4	**Tipo 4**			
ID504_04		Tipo 4	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 4	**Tipo 4**			
ID541_08		Tipo 2	Tipo 4	Tipo 4	Tipo 4	**Tipo 4**			
ID602_03		Tipo 4	Tipo 4	Tipo 4	Tipo 3	**Tipo 4**			
ID524_06	Tipo 3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 3	*Tipo 2*	3	3	50%
ID524_08		Tipo 4	Tipo 4	Tipo 3	Tipo 1	*Tipo 4*			
ID534_07		Tipo 3	Tipo 4	Tipo 3	Tipo 2	**Tipo 3**			
ID534_09		Tipo 3	Tipo 3	Tipo 3	Tipo 4	**Tipo 3**			
ID649_05		Tipo 3	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 4	*Tipo 2*			
ID718_04		Tipo 3	Tipo 3	Tipo 2	Tipo 3	**Tipo 3**			
ID386_05	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	**Tipo 2**	4	2	67%
ID386_08		Tipo 2	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 3	*Tipo 3*			
ID417_08		Tipo 2	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 1	**Tipo 2**			
ID417_11		Tipo 2	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 1	*Tipo 1*			
ID486_17		Tipo 2	Tipo 4	Tipo 2	Tipo 1	**Tipo 2**			
ID584_04		Tipo 2	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	**Tipo 2**			
ID338_14	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 1	**Tipo 1**	6	0	100%
ID338_20		Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 4	**Tipo 1**			
ID365_17		Tipo 1	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	**Tipo 1**			
ID365_19		Tipo 2	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	**Tipo 1**			
ID462_03		Tipo 3	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	**Tipo 1**			
ID514_03		Tipo 1	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 1	**Tipo 1**			

MT-A: médico traumatólogo A, MT-B: médico traumatólogo B, IB: ingeniero biomédico, F: fisioterapeuta

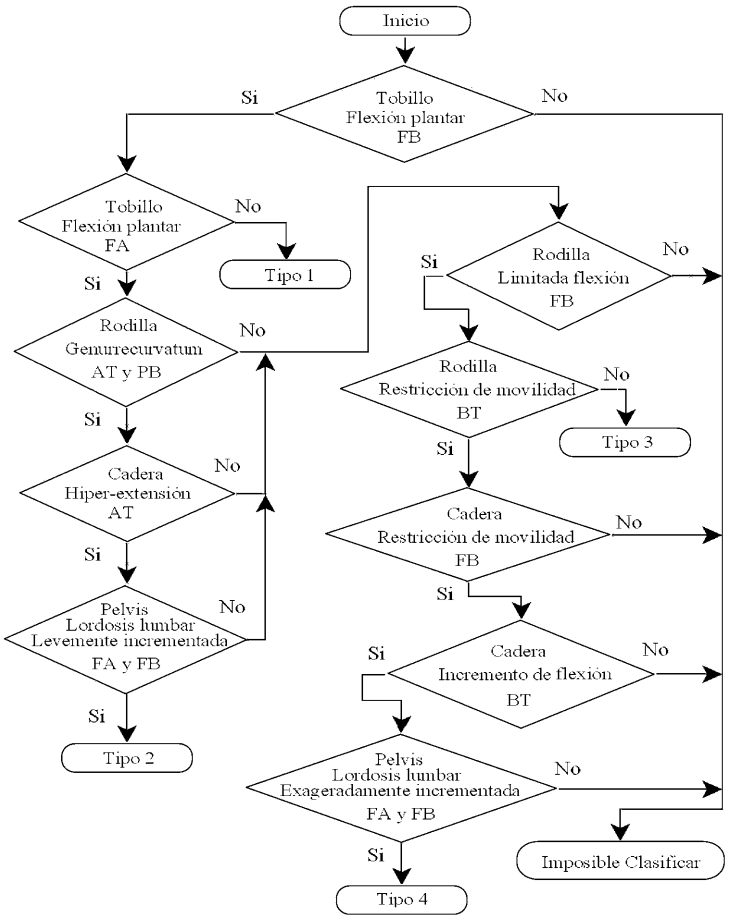

Figura 15. Algoritmo de clasificación con los indicadores extraídos de los especialistas.

tíficas y metódicas. Incorporar al especialista en la interpretación y análisis de la marcha HE certifica que los indicadores extraídos puedan ser utilizados por otros expertos. La validación cuantifica la alta sensibilidad que tienen los indicadores para clasificar, en función de la capacidad de éstos de acertar correctamente el tipo de hemiplejia del paciente. Clasificar correctamente un paciente hemipléjico implica realizar un apropiado diagnóstico y, por ende, garantizar adecuada evolución al tratamiento. Los especialistas expresaron sentirse cómodos con el lenguaje y términos de estos indicadores. Este trabajo proporciona los indicadores de una manera más objetiva, con mínima incertidumbre para clasificar acertadamente los pacientes hemipléjicos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al personal de médicos traumatólogos, fisioterapeutas e ingenieros biomédicos que colaboraron en este estudio, en especial a Carlos Prato, jefe de la unidad de Laboratorio de Marcha del Hospital Ortopédico Infantil, Caracas, Venezuela.

REFERENCIAS

Aguilera A, Subero A (2009) A coordination model for medical diagnosis. *Int. J. Appl. Biomed. Eng. 2*: 60-68.

Cala L (2010) Aplicación de Apoyo al Diagnóstico en Marcha Patológica Mediante Análisis Cinético. Proyecto de Tesis. Universidad de Carabobo. Venezuela. 116 pp.???.

Dao T, Marin F, Ho Ba Tho M (2011) Modeling of Musculoskeletal System Using Biomechanics and Knowledge Engineering Approaches: Clinical Benefits and Limitations. *Int. Soc. Biomech. Congr.* (03-07/07/211). Bruselas, Bégica.

Davis R, Õunpuu S, DeLuca P (1997) Clinical gait analysis interpretation: an approach and proposed enhancement. *Proc. 19th Int Conf IEEE/ EMBS* (30/10-02/11). Chicago, IL. EEUU.

Davis R, Õunpuu S, DeLuca P, Romness M (1999) Clinical gait analysis and its role in treatment decision-making. Medscape Orthopaed. *Sports Med. J.* www.medscape.com/viewarticle/440148

Dobson F, Morris M, Baker R, Graham H (2007) Gait classification in children with cerebral palsy: A systematic review. *Gait Post. 25*: 140-152.

Gage J, Deluca P, Renshaw T (1995) Gait analysis: Principles and applications. *J Bone Joint Surg. Am. 77*: 1607-1623.

Gage J (1991) *Gait Analysis in Cerebral Palsy*. Mac Keith Press. Londres, RU. 206 pp.

McDowell B, Kerr C, Connor K, Salazar J, Cosgrove A (2008) The validity of an existing gait classification system when applied to a representative population of children with hemiplegia. *Gait Post. 28*: 442-447.

Moreno A, Gutiérrez E, Pérez J (2008) Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogrametría, electromiografía y dinamometría. *Ing. Bioméd*. (Col.) *2*(3): 16-26.

Padilla U (2013) Classification of hemiplegic gait using kinetic data on ankle. En Marascu-Klein (Ed.) *Advances in Biomedicine and Health Science,* Vol. 2. pp. 37-44.

Perry J, Burnfield J (2010) *Gait Analysis. Normal and Pathological Function*. 2nd ed. Slack. Thorofare, NJ, EEUU. 551 pp.

Posadas A, Rupcich M, Bravo R, Urbano D, Barreto M (2000). *La Ortopedia Infantil hacia el Siglo XXI*. Curso Pre-Congreso: Análisis 3D de la Marcha Normal. X Jornadas Científicas Hospital Ortopédico Infantil (25-28/10). Caracas, Venezuela.

Riad J, Haglund-Akerlind Y, Miller F (2007) Classification of spastic hemiplegic cerebral palsy in children. *Pediatr. Orthoped 27*: 758-764.

Ríos PA (2007) *Aproximación a la Evaluación de Alineación de Prótesis Transtibial Basado en Cinemática y Cinética de Marcha*. Tesis. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 173 pp.

Rupcich M, Bravo R, Urbano D (2008) Patrones de movimiento pélvico en pacientes con hemiplejia. *Arch. Puericult. Pediatr. 71*: 48-52.

Salazar-Torres J, McDowell B, Kerr C, Cosgrove A (2011) Pelvic kinematics and their relationship to gait type in hemiplegic cerebral palsy. *Gait Post. 33*: 620-624.

Vannozzi G, Della Croce U, Starita A, Benvenuti F, Capozzo A (2004) Knowledge discovery in databases of biomechanical variables: application to the sit to stand motor task. *J. Neuroeng. Rehabil. 1*: 7.

Vaughan CL, Davis BL, O'Connor JC (1999) *Dynamics of Human Gait*. 2ªed. Kiboho. Cape Town, Suráfrica. 141 pp.

Vicon (2013) http://www.vicon.com/applications/gait_analysis.html (Vons. 10/2013)

Viloria M, Ninoska C (2003) *Evaluación Electromiográfica de la Clasificación Cinemática de Hemipléjicos Espásticos con Marcha Patológica*. Tesis. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. 17 pp.

Watelain E (1999) *Proposition d'une Methodologie d'Analyse du Mouvement: Application a la Marche du Sujet Hemiplegique*. Tesis. Université de Lille. Francia. 166 pp.

Watelain E, Froger J, Rosseaux M, Lensel G, Barbier F, Lepoutre FX, Thevenon A (2005) Variability of video-based clinical gait analysis in hemiplegia as performed by practitioners in diverse specialities. *J. Rehabil. Med. 37*: 317-324.

Winter D (2009) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4ª ed. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 384 pp.

Winters T, Gage J, Hicks R (1987) Gait patterns in spastic hemiplegia in children and young adults. *J. Bone Joint Surg Am. Vol 69*: 437-441.

DEDUCTION OF INDICATORS PERMITTING TO OBJECTIVELY CLASSIFY SPASTIC HEMIPLEGIC GAIT

Ubaldo Rafael Padilla Liendo

SUMMARY

Hemiplegia is a motor dysfunction with neuromuscular implications of unilateral body predominance including gait. Its analysis and interpretation involves a multidisciplinary staff. The specialists or experts: traumatologists, physiotherapists and biomedical engineers, analyze kinematic curves in order to classify the patient in one of the hemiplegic types proposed by Gage. The classification is empirical, depending on the experience, errors or successes of the specialist, and subjective, since its analysis is the result of comparing and articulation ranges. The present study aims to identify the indicators utilized by the specialists to classify the type of hemiplegia to which recordings previously classified belong. Twenty four records were randomly selected out of a sample of 186 patients from the Gait Laboratory of the Children Orthopedic Hospital, Caracas, Venezuela. The methodology employed is the triangulation of the analysis performed to classify or validate the errors and successes of the expert during the process of interpretation. A sensitivity of 100% is obtained to differentiate type 1 patients, of 67% for type 2 patients, 50% for type 3 and 83% for those of type 4. The indicators are expressed by means of a language known by the specialists, modeled with an algorithm coherent to the analysis procedure from distal to proximal, capable of precisely describing the hemiplegic gait. The sensitivity results infer an appropriate diagnosis of the modeled object that assures a treatment adequate to the type of hemiplegia.

DEDUÇÃO DE INDICADORES QUE PERMITEM CLASSIFICAR OBJETIVAMENTE A MARCHA HEMIPLÉGICA ESPÁSTICA

Ubaldo Rafael Padilla Liendo

RESUMO

A hemiplegia é uma disfunção motora com implicações neuromusculares de predomínio unilateral corporal e alterações na marcha. Sua análise e interpretação envolve uma equipe multidisciplinar. Os especialistas ou expertos: médicos traumatologistas, fisioterapeutas e engenheiros biomédicos, analisam as curvas cinemáticas para classificar ao paciente em um dos grupos hemiplégicos proposto por Gage. A classificação é empírica por depender da experiência, erros, acertos do especialista, e subjetiva porque sua análise é o resultado de comparar curvas e rangos articulares. O presente estudo pretende identificar os indicadores utilizados pelos especialistas, para classificar o tipo de hemiplegia ao que pertence um grupo de registros previamente classificados. Aleatoriamente foram selecionados 24 registros de uma amostra de 186 pacientes, obtidos no Laboratório de Marcha do Hospital Ortopédico Infantil de Caracas, Venezuela. A metodologia empregada é a triangulação das análises realizadas para classificar e validar os erros ou acertos do experto, durante o processo de interpretação. Se obtém uma sensibilidade de 100% que permite diferenciar os pacientes tipo 1, 67% para os de tipo 2, 50% para o tipo 3 e 83% para o tipo 4. Os indicadores são expressos mediante uma linguagem conhecida pelos especialistas, modelados mediante um algoritmo coerente ao procedimento de análise de distal a proximal, capaz de descrever com precisão a marcha hemiplégica. Os resultados de sensibilidade inferem um apropriado diagnóstico do modelado que assegura um tratamento adequado ao tipo de hemiplegia.