

# Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogrametría, electromiografía y dinamometría

Adriana Villa Moreno<sup>1, 2, ψ</sup>, Eduardo Gutiérrez Gutiérrez<sup>2</sup>, Juan Carlos Pérez Moreno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Ingeniería Biomédica. Escuela de Ingeniería de Antioquia – Universidad CES, Colombia

<sup>2</sup>Laboratorio de Análisis de Movimiento, Centro de Rehabilitación Infantil Teletón, México

Recibido 27 de marzo de 2008. Aceptado 28 de abril de 2008.

---

**Resumen**— El análisis de la marcha humana resulta ser de gran utilidad para una amplia gama de aplicaciones, como el diagnóstico y elección de tratamientos en pacientes con enfermedades neuro-músculo-esqueléticas. Los métodos y tecnologías existentes para este análisis son numerosos, y permiten la obtención de los parámetros cuantitativos característicos de un patrón de marcha de manera objetiva. Durante el análisis de marcha muchos factores deben ser considerados para realizar los estudios adecuadamente, algunos de ellos se deben tener en cuenta desde la etapa de configuración y planeación del laboratorio, otros para el proceso de adquisición de los parámetros, y otros para el análisis de los resultados. En este trabajo se presentan algunas de estas consideraciones que parten tanto de la revisión bibliográfica como de la experiencia directa con pacientes, enfocadas principalmente en sistemas que combinan técnicas de videogrametría, dinamometría y electromiografía, por ser estos los de mayor utilización en la actualidad.

**Palabras clave**—Análisis de marcha, Electromiografía, Laboratorio de análisis de marcha, Patrón de marcha, Plataformas de fuerzas, Videogrametría.

**Abstract**—Human gait analysis has been used in a wide range of applications, such as diagnosis and treatment selection for patients with neuro-muscular-skeletal diseases. The methods and technologies that exist for gait analysis are numerous, and they allow the recollection of the main quantitative parameters of a gait pattern in an objective way. A lot of factors must be considered during gait analysis in order to obtain reliable results; some of them must be taken into account, including the planning and configuration of the laboratory, the acquisition process and the results analysis system. This paper presents some considerations derived from the literature review and also from the direct experience with patients. They are mainly focused in systems which use techniques such as videogrammetry, dynamometry and electromyography, since they are the most used nowadays.

**Keywords**— Gait analysis, Electromyography, Gait analysis laboratory, Gait pattern, Force platforms, Videogrammetry.

---

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el estudio de la marcha humana es una herramienta diagnóstica importante en la evaluación de patologías neuro-músculo-esqueléticas, ya sean transitorias o permanentes, locales o generales [1, 2]; aunque, comúnmente, otros padecimientos que afectan la deambulación son evaluados. Algunos de estos son la presencia de dolor, que lleva a adoptar posturas antiálgicas, enfermedades de debilitamiento general como cánceres, patologías respiratorias, edad, obesidad [3], o incluso problemas psicológicos o psiquiátricos como cuadros depresivos [4].

En la práctica química, un análisis completo de la marcha de un paciente permite identificar los problemas específicos que la afectan, y partiendo de estos es posible realizar la prescripción quirúrgica, terapéutica, farmacológica (generalmente con toxina botulínica [5, 6]) o de ayudas técnicas, para maximizar las habilidades físicas del paciente [7-10]. Además, estos sistemas de análisis han sido utilizados en otros campos como la biomecánica deportiva [11], ergonomía, diseño y evaluación de calzado, ayudas técnicas [12, 13] u otros productos, evaluación de riesgo en actividades físicas, o simplemente para el estudio general de la biomecánica [14]. Por lo tanto este tipo de

estudios se conoce de forma más amplia como análisis de movimiento [15, 16]. Incluso, su campo de aplicación se ha extendido más allá del estudio del ser humano, y se ha utilizado para evaluaciones biomecánicas en animales [17].

Para el análisis de marcha es necesario contar con un protocolo estandarizado que permita obtener los parámetros de interés de forma confiable y eficaz. Cada protocolo depende del tipo de pacientes a evaluar, la configuración del laboratorio, los parámetros que se deseen obtener y la forma en que éstos son presentados, así como del orden, tiempo y ciclos de utilización de los equipos, la colocación de los marcadores (cuando se requieren) y los programas para el procesamiento de los datos, entre otros aspectos.

El presente artículo consigna algunas consideraciones para tener en cuenta en el momento de la estandarización de un protocolo para el análisis de marcha, y discute algunos aspectos fundamentales con gran influencia en los resultados obtenidos de este proceso. El trabajo se basa tanto en la revisión bibliográfica como en la experiencia con 120 pacientes con edades entre los 2 y 18 años y con diferentes patologías neuro-músculo-esqueléticas, a los que se les realizó el estudio utilizando el Laboratorio de Marcha de BTS Bioengineering de seis cámaras y una plataforma de fuerzas, con el software Gait Eliclinic® versión 2.9.

## II. CONSIDERACIONES PARA LA CONFIGURACIÓN DEL LABORATORIO

### *Parámetros de la marcha*

Un patrón de marcha humana puede ser caracterizado con diferentes tipos de parámetros, algunos básicos y otros de mayor complejidad. De la forma más básica, la marcha se describe mediante parámetros espacio-temporales. Aunque estos parámetros no sólo varían entre sujetos sino también en el mismo sujeto, resultan ser representativos de una persona cuando las condiciones y los factores que afectan la marcha (como terreno, calzado, transporte de carga, edad, fatiga, peso) se mantienen constantes [1].

Sin embargo, se obtiene una descripción más detallada del ciclo de la marcha al utilizar información cinemática, y en mayor medida si el estudio se completa con información cinética. Con los estudios cinemáticos es posible registrar las variaciones angulares de las articulaciones del cuerpo así como la inclinación, torsión y oscilación de los segmentos corporales. Por su parte, los estudios cinéticos se enfocan principalmente en reportar las

fuerzas de reacción del suelo y los momentos y potencias presentes en las articulaciones [14, 18].

Las gráficas cinéticas de las fuerzas de reacción permiten analizar aspectos del patrón como la oscilación vertical del centro de gravedad (CG) durante el apoyo (fuerza vertical) (Fig. 1), las fuerzas de frenado y empuje (longitudinal), y la resistencia a la pronosupinación del pie (medio-lateral). Además, es posible analizar la generación o absorción de energía mecánica en las articulaciones debido a la acción muscular, mediante las gráficas de potencia. La cinética permite también analizar la inclinación (anterior, posterior o neutra de todo el cuerpo) que presenta el sujeto al caminar, lo cual tiene consecuencias directas en el rendimiento energético.

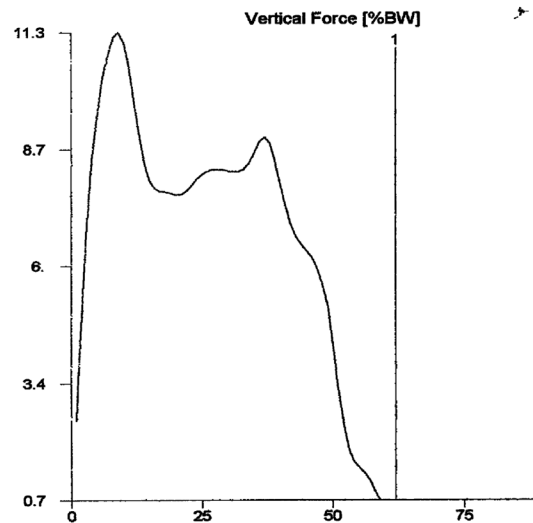


Fig. 1. Gráfica de fuerza de reacción vertical en el pie derecho en función del porcentaje del ciclo, obtenida con el software GaitEliclinic® V. 2.9.

En algunos casos se realizan otros estudios complementarios como el registro de la actividad muscular con electromiografía (EMG) dinámica, la determinación del consumo energético, o el monitoreo del gasto cardio-respiratorio mediante espirometría [12, 18-20]. Mediante la electromiografía es posible diagnosticar problemas en los músculos, en las uniones neuro-musculares, o desórdenes nerviosos [21]. La interpretación de la secuencia de activación y la intensidad relativa del esfuerzo presentes en la señal de EMG, permiten evaluar la efectividad funcional de la acción muscular. Sin embargo, nunca se obtiene una medida directa de la fuerza muscular, ya que ésta depende de factores adicionales como el tipo de contracción, la velocidad de contracción, la posición articular y la acción sinérgica de los músculos [18].

La Tabla 1 contiene información más detallada de los parámetros espaciotemporales, cinéticos y cinemáticos que usualmente se analizan en estudios de marcha.

**Tabla 1.** Parámetros espacio-temporales, cinemáticos y cinéticos obtenidos generalmente en estudios de marcha humana.

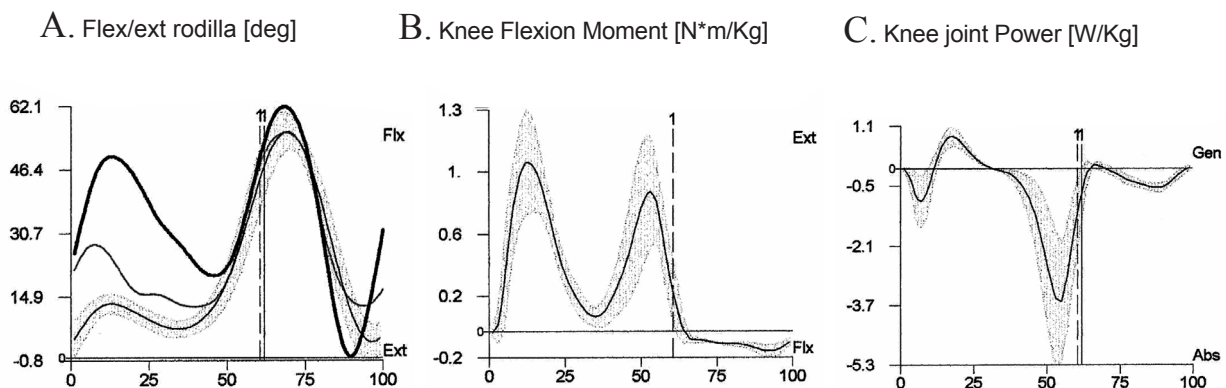
PARÁMETROS DE LA MARCHA		
ESPACIOTEMPORALES	CINEMÁTICOS	CINÉTICOS
<b>Temporales</b>	Valores de los ángulos articulares con el paciente de pie (valores de <i>offset</i> para la cinemática)	Gráficas de momentos en las articulaciones (generalmente en el plano sagital)
Tiempo en fase de soporte (ms)		
Tiempo en fase de balanceo (ms)		
Tiempo de soporte (% del ciclo)	<b>Plano frontal</b>	Gráficas de potencias en las articulaciones (generalmente en el plano sagital)
Tiempo de balanceo (% del ciclo)	Oblicuidad de la pelvis	
Duración del ciclo o zancada (ms)	Aducción-abducción de cadera	
Cadencia (pasos/min)	<b>Plano sagital</b>	Fuerza de reacción antero-posterior
Duración de doble soporte (ms)	Basculación de pelvis	
Porcentaje de doble soporte (% ciclo)	Flexo-extensión de cadera	Fuerza de reacción medio-lateral
<b>Espaciales</b>	Flexo-extensión de rodilla	Fuerza de reacción vertical
Largo del paso (mm)	Dorsiflexión-plantiflexión de tobillo	
Longitud del ciclo o zancada (mm)	<b>Plano transversal</b>	Gráficas del centro de presión antero-posterior
Ancho del paso (mm)	Rotación pelvis	
<b>Espaciotemporales</b>	Rotación interna-externa de cadera	
Velocidad (m/s)	Rotación interna-externa de rodilla	
Velocidad de balanceo (m/s)	Ángulo de progresión del pie	
Velocidad media (m/s)		

\*Las gráficas de rodilla y tobillo en el plano frontal no son tan significativas para el análisis, pero pueden obtenerse.

Por su parte, las Fig. 1 y 2 muestran como ejemplo algunas de las gráficas cinemáticas y cinéticas que se obtienen.

La definición de los parámetros de interés para las necesidades específicas del laboratorio es el punto de partida para la configuración del mismo. Según el tipo de estudios que quieran realizarse, y el tipo de pacientes que se desee estudiar, la obtención de los diferentes tipos de parámetros (espaciotemporales, cinéticos, cinemáticos o complementarios) puede ser de gran importancia o no serlo. Por citar un ejemplo, si se pretende estudiar el uso de ayudas técnicas como muletas o caminadores, se debe tener en cuenta que los parámetros espaciotemporales y cinemáticos resultan fundamentales, pero los cinéticos en la mayoría de los casos no pueden ser adquiridos, ya

que el apoyo de elementos externos sobre los equipos de medición distorsiona el patrón de la fuerza que realmente está actuando en el paciente. De manera similar, para la elección del software indicado para el procesamiento de los datos, se debe tener en cuenta características de los pacientes como las edades, la accidentalidad en su marcha, las patologías y la utilización o no de ayudas técnicas. Por ejemplo, si se trabaja con pacientes infantiles con enfermedades neuro-músculo-esqueléticas, es fundamental considerar los tiempos que toma el software para la calibración de los puntos anatómicos a partir de los cuales se obtendrán los parámetros en algunos



**Fig. 2.** A. Cinemática de la rodilla derecha e izquierda en el plano sagital (grados vs % ciclo de la marcha). B. Momentos de la rodilla derecha, plano sagital (Nm/kg vs % ciclo de la marcha). C. Potencias en la rodilla derecha, plano sagital (W/Kg vs % ciclo de la marcha). Gráficas obtenidas con el software GaitEliclinic® V. 2.9.

de los sistemas de análisis. Tiempos muy amplios en los que el paciente debe estar de pie con el menor movimiento posible, en la mayoría de los casos impedirían la obtención de las coordenadas anatómicas por la edad y la naturaleza patológica de los pacientes.

### *Equipos*

Para la obtención de los parámetros de interés se tienen varias alternativas de equipos que pueden ser utilizados. Estos equipos permiten evaluar la marcha de forma cuantitativa. Los laboratorios más sencillos pueden obtener los parámetros espaciotemporales mediante la utilización de cintas métricas, cronómetros y un análisis visual sistemático [4, 22]. Para los análisis cinemáticos y cinéticos, se cuenta con gran variedad de herramientas como la dinamometría, acelerometría, ultrasonido, goniometría digital, sistemas de análisis en dos y tres dimensiones, entre otros [8, 18, 23]. Estas técnicas permiten extraer información cuantitativa y más confiable que la obtenida con la simple observación de los eventos, siendo esta última inadecuada estadísticamente [24]. Actualmente uno de los métodos más utilizados es la combinación de plataformas dinamométricas para la cinética con técnicas de videogrametría para la cinemática, comúnmente en unión a sistemas de registro de EMG dinámica [7, 25]. Para esta última se utilizan sistemas telemétricos multicanal que permiten al paciente realizar su marcha libremente, de modo que se puede registrar simultáneamente la acción de varios grupos musculares para ser posteriormente contrastada con la información cinética y cinemática en todas las fases del ciclo de la marcha. En adelante, el artículo se enfoca en las consideraciones para esta configuración específica del laboratorio, aunque algunos aspectos podrían ser analizados de forma análoga para configuraciones diferentes.

## III. CONSIDERACIONES PARA EL PROCESO DE ADQUISICIÓN

### *Posicionamiento de marcadores*

Uno de los aspectos con mayor influencia durante el proceso de adquisición en los análisis mediante videogrametría, es el protocolo de colocación de los marcadores que utiliza el sistema para detectar los puntos anatómicos. Para la colocación de los marcadores algunos de los protocolos más conocidos son Newington, Gage, Davis, Helen Hayes, Kadaba o el modelo VCM (*Vicon Clinical Manager*) [20].

Entre estos, el protocolo Davis es uno de los más utilizados actualmente [9, 26]. Este protocolo usa como

puntos anatómicos de referencia prominencias óseas como el acromion, la espina iliaca antero-superior, el trocánter mayor, el cóndilo femoral lateral, la cabeza del peroné, el maléolo lateral, la cabeza del quinto metatarsiano, la séptima vértebra cervical, la primera vértebra sacra y los calcáneos. Utiliza también marcadores proyectados en barras para la mitad del muslo derecho e izquierdo y la mitad de la pierna derecha e izquierda. Estos marcadores reflectivos, que son detectados por las cámaras infrarrojas, son adheridos a la piel del paciente en los puntos mencionados [27].

El posicionamiento de los marcadores es un punto crítico y una fuente considerable de errores en los parámetros. Lo ideal para obtener los movimientos más precisos de los huesos sería ubicar los marcadores directamente adheridos a las estructuras óseas, sin embargo las desventajas son evidentes en cuanto al dolor, riesgo en el procedimiento y la modificación de los movimientos naturales. Por esto se utilizan los marcadores adheridos a la piel en puntos anatómicos de referencia como se mencionó para el protocolo Davis. Sin embargo, se ha reportado que ésta es la configuración menos precisa para los marcadores, debido a que cada uno presenta desplazamientos independientes respecto al hueso. Algunos estudios han reportado hasta 40 mm de errores traslacionales y más de 13 grados en errores rotacionales [28, 29]. Otros estudios que analizan la similitud entre los resultados obtenidos en estudios con marcadores en la piel y marcadores adheridos al hueso, han encontrado errores relativos del 21% en movimientos de flexo-extensión, 63% en aducción-abducción y 70% en rotación interna y externa, aunque los desplazamientos dependen del gesto que se esté realizando [28]. Se ha confirmado con estudios adicionales que la mayor inestabilidad se da en el plano transversal, seguido por el frontal, y que en el plano sagital no es tan significativa [30, 31].

Para contrarrestar este inconveniente, algunos protocolos utilizan arreglos de marcadores adheridos a superficies rígidas, o la combinación de estos arreglos con marcadores independientes [14, 28]. Esto, además de hacer más práctica la colocación de marcadores, ayuda a mejorar la precisión, ya que los desplazamientos de los marcadores no son individuales [28]. Por otro lado, el uso de marcadores en barras proyectadas lateralmente al segmento (como los utilizados para la mitad de cada muslo y la mitad de cada pierna en el protocolo Davis), utilizadas para un mejor cálculo de las rotaciones en el eje longitudinal, puede generar mayores errores debido a la vibración que presentan cuando el impacto del talón es brusco o la inercia del gesto es alta. No obstante, el posicionamiento ideal de los marcadores es

un aspecto con el que aún no se ha llegado a un acuerdo, y por lo tanto es una falencia común en los protocolos actualmente utilizados, siendo reportado como una fuente de error mayor que los errores instrumentales y de calibración [14, 20, 32]. Otro error adicional se debe a la incorrecta detección de los puntos anatómicos para la colocación de los marcadores, que es especialmente difícil en pacientes con ciertas condiciones patológicas, aunque también es una fuente de error común para todos los protocolos [8, 20]. Para evitar estos errores se están realizando nuevos avances como la unión con sistemas de resonancia magnética, fluoroscopia o radiografía para tener conocimiento constante del posicionamiento óseo, aunque sólo se logra en volúmenes pequeños de muestreo [10, 20]. Otro punto de partida que se ha reportado para la disminución de estos errores es la colocación de los marcadores en posiciones más alejadas de los centros articulares [14], pero esto podría dificultar y hacer más subjetiva esta colocación, pues los centros articulares que tienen prominencias óseas son de más fácil reconocimiento mediante palpación.

#### *Calibración del sistema*

Pasando a otro aspecto fundamental durante la adquisición, se debe tener en cuenta el proceso de calibración. Como en la mayoría de sistemas, se debe ser estricto en el cumplimiento de los parámetros especificados por el fabricante para asegurar calibraciones adecuadas, porque de lo contrario se incurriría en grandes dificultades para el procesamiento de los datos, o en resultados erróneos. Los sistemas de videogrametría requieren tres tipos de calibración: linealización de las cámaras, calibración dinámica 3D (ó 2D) del volumen de muestreo (campo visual de las cámaras), y calibración geométrica de forma de la(s) plataforma(s) de fuerzas y su ubicación en el espacio (cuando la(s) hay). Sin embargo, antes de realizar esta calibración se debe hacer una revisión en el monitor de lo que está siendo capturado por cada una de las cámaras, mediante la colocación de unos marcadores de referencia en el volumen de muestreo, de modo que se pueda verificar que se esté identificando el total de los marcadores y que no se esté tomando como marcador algún punto fantasma. En caso de no visualizar lo esperado se debe realizar un ajuste a los diafragmas de las cámaras o eliminar objetos que puedan estar causando este error.

Por su parte, las plataformas de fuerzas deben ser calibradas mediante la estabilización de los puentes de *wheatstone* que se forman entre las galgas extensiométricas que las componen. Esta calibración generalmente debe

realizarse con mayor frecuencia que la del sistema de videogrametría.

Es importante definir la frecuencia en que cada una de las partes del sistema debe ser calibrada y lo estricta que debe ser esta calibración, lo cual también depende del tipo de estudios que se realicen. Pacientes de estaturas menores y de marchas más accidentadas hacen necesaria una calibración más estricta, pues el reconocimiento de los marcadores por las cámaras se hace especialmente difícil y la aparición de marcadores falsos o fantasma es frecuente.

Además, el hecho de tener una buena calibración permite realizar los estudios de la mejor manera para el paciente. En casos en los que no hay una buena calibración se hace necesario el registro de muchos recorridos hasta que se obtenga uno que puede ser analizado, lo cual es una gran desventaja principalmente al trabajar con pacientes que se fatigan rápidamente o que experimentan dolor durante la marcha. En estos casos tener que realizar varios recorridos no solo sería un inconveniente para el paciente, sino que además afectaría los resultados, pues se estaría analizando un patrón de marcha con fatiga o con mayor presencia de dolor y que no correspondería al patrón natural. Adicionalmente, se estaría evidentemente perdiendo eficiencia en los estudios y de ese modo no habría una utilización óptima del laboratorio. Por lo tanto, es recomendable invertir más tiempo en la calibración, aunque haya que repetirla hasta obtener una adecuada, y no aumentar los tiempos de los estudios con los pacientes.

#### *Pista o pasillo*

Las dimensiones de la pista o pasillo en el que el paciente realiza su marcha, deben ser suficientes para lograr la ejecución de más de un ciclo completo de la marcha a cadencia libre. Cuando el paciente se encuentra al inicio o al final de la pista, la captura de los marcadores por las cámaras se dificulta, por la posición del sujeto con respecto a éstas. Para clarificar se puede ver en la Fig. 3 un ejemplo de la reconstrucción tridimensional de un laboratorio de seis cámaras, que incluye las cámaras, la pista, el volumen de muestreo y se observa la dirección de progresión del modelo tridimensional del paciente utilizando el protocolo Davis. Para tener los parámetros de la marcha se necesita como mínimo el análisis de un ciclo completo, que consiste en dos pasos o una zancada, pero como en los extremos de la pista el reconocimiento de los marcadores no es tan bueno, es recomendable que el paciente tenga suficiente espacio para realizar más de un ciclo completo.



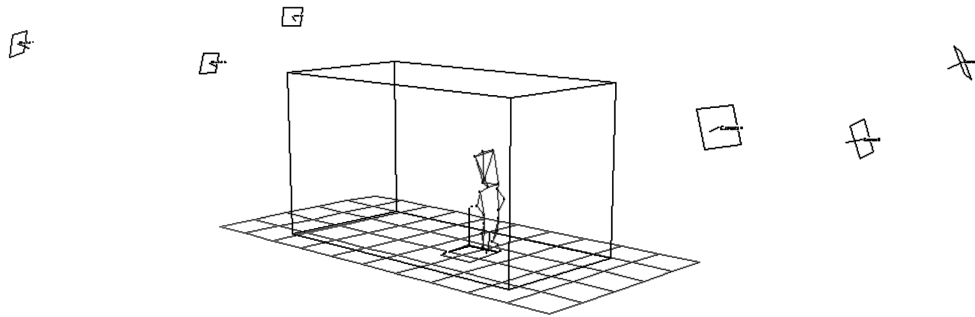


Fig. 3. Reconstrucción tridimensional de un laboratorio de seis cámaras. Obtenida con el software GaitEliclinic® V. 2.9.

En muchos casos, la utilización de pistas de aproximadamente 4 m resulta suficiente para establecer una marcha natural [33]. En niños sanos, el largo de zancada promedio es de 1,07 m aproximadamente [34], mientras que en personas de 10 a 79 años el máximo promedio se da en los hombres de 15 a 19 años y es de 1,2 m en marchas normales, llegando hasta 1,6 m en promedio en marchas rápidas con una desviación estándar de 0,06 m en cada paso [35]. Así, en algunos casos un pasillo de 4 m sería apenas suficiente para realizar 2 ciclos completos, y el análisis debería realizarse sobre los dos pasos intermedios (1 sólo ciclo), de modo que no se incluya el paso inicial ni el final. Los niños de estaturas menores podrían alcanzar a realizar incluso más de cuatro ciclos completos, sin embargo en estos casos el reconocimiento de los marcadores por las cámaras se dificulta y por lo tanto el análisis muchas veces se refiere a uno o dos ciclos solamente. Pistas más largas permiten una marcha más típica y mayor información para realizar cálculos estadísticos de los parámetros. Por esto en algunos laboratorios se utilizan pistas de 10 o 20 m como en los de *Derby Hospitals* [36] y *University of Nebraska Medical Center* [37] o se hace el análisis en bandas caminadoras instrumentadas con plataformas de fuerzas como en el laboratorio de *University of Virginia* [38]. Esta última opción permite además analizar el patrón de marcha en planos inclinados mediante la elevación de los extremos de las bandas con pistones, sin embargo en éstas el patrón no es del todo natural ya que no son las mismas condiciones para caminar que en terrenos estáticos. Se han reportado diferencias significativas en estudios de sujetos caminando en ambas condiciones [39].

Cuando el laboratorio se utiliza para el análisis de un gesto deportivo, el ancho de la pista resulta ser también fundamental.

### *Plataformas de fuerzas*

Generalmente, en los laboratorios se obtiene la cinética de un solo paso, cuando sería ideal tener la información estadística de más pasos para asegurar un patrón más típico. Para esto sería necesario contar con varias plataformas dinamométricas o tener la posibilidad de promediar los datos de diferentes recorridos. Si se cuenta con dos plataformas es posible registrar en el mismo recorrido la información cinética de ambos pies, aunque es difícil la ubicación relativa de ambas para que coincida con los anchos y largos de paso de los pacientes. Incluso, con la utilización de una sola plataforma, resulta a veces complicado obtener el paso limpio sobre ella, y para lograrlo el paciente debe ser reubicado varias veces en diferentes posiciones de inicio hasta que el paso sea ubicado correctamente y sin que el paciente sea informado de esta necesidad. Con algunos pacientes la obtención de este paso limpio es aún más complicada, como cuando hay marchas muy accidentadas (por ejemplo en tijera) o hay utilización de ayudas técnicas que al ser apoyadas en la plataforma distorsionan el patrón.

Serían necesarias al menos cuatro plataformas (como en *University of Nebraska Medical Center* [37]) para tener datos promediados de las fuerzas de reacción de ambos pies en un solo recorrido, pero la ubicación relativa de las mismas resulta ser de mayor complejidad. También podrían obtenerse datos promediados con la utilización de dos plataformas dispuestas de modo que no se tenga una para cada pie, sino las dos para el mismo pie en pasos diferentes del mismo recorrido, haciendo el estudio primero para un pie y luego para el otro, aunque igualmente en algunos casos no podrían obtenerse estos dos pasos limpios por las diferencias entre la posición relativa de las plataformas y los largos de paso de los

pacientes. En laboratorios empleados para el análisis de sujetos sanos o con marchas no muy accidentadas, podría tenerse una buena aproximación para la ubicación relativa de las plataformas, dependiendo de las edades de los pacientes, pero no así cuando se evalúan marchas complicadas, pues los anchos y largos de los pasos son muy irregulares.

#### IV. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### *Presentación de resultados*

Para el despliegue de los resultados generalmente se utilizan reportes bien sea electrónicos o impresos de la información obtenida, sea en tablas con los parámetros o a modo de gráficas cinemáticas, cinéticas o electromiográficas. Usualmente, los programas permiten adaptar los reportes para que incluyan sólo los parámetros que, de momento, sean de interés para el análisis.

Los resultados cinemáticos y cinéticos presentados en las gráficas podrían ser complementados con el registro de los valores numéricos de ángulos y tiempos en partes específicas del ciclo, como los utilizados por Benedetti *et al.* [14], de modo que se reduzca la subjetividad en el análisis de las gráficas y la variabilidad que se presenta cuando los análisis son realizados por diferentes especialistas [40]. Con el mismo propósito, sería ideal introducir técnicas especiales de análisis de múltiples variables, aunque no es fácil la determinación de ciertos parámetros cuando las curvas de movimiento son atípicas como en las condiciones patológicas que generalmente se estudian [10].

Con los reportes generados es posible obtener información acerca de la eficiencia de la marcha, su grado de normalidad o la regularidad del movimiento, y con base en esto elegir el tratamiento más efectivo para los problemas específicos de la marcha, así como obtener caracterizaciones más precisas de las diferentes patologías para el diagnóstico y el conocimiento de la severidad de la enfermedad en cada paciente.

##### *Modos de análisis*

Para realizar estudios de marcha no solo resulta útil el análisis de la cinemática, cinética, electromiografía y parámetros espaciotemporales en los reportes, sino además la visualización de los estudios y los parámetros obtenidos desde el mismo monitor. Para esto, algunos programas presentan la reconstrucción tridimensional del movimiento del sujeto con un modelo, lo cual permite la validación de los parámetros de análisis y una mejor visualización de los eventos cuantas veces sea necesario, desde todos los puntos de vista y con

las velocidades de progresión controladas. Dos formas prácticas de visualización se muestran en la Fig. 4 y la Fig. 5. En la Fig. 4 se muestra simultáneamente la reconstrucción 3D del sujeto con tres gráficas cinemáticas o cinéticas 2D elegidas por el operario. En éstas, la progresión del sujeto se va mostrando en las gráficas 2D mediante una línea de tiempo a la vez que el modelo tridimensional esquematiza la locomoción del paciente. Otra práctica forma de análisis se muestra en la Fig. 5, obtenida con el programa Viewer 3D®, el cual permite visualizar la reconstrucción de las estructuras óseas. En estos modos de visualización también es posible ver cómo está el vector de la fuerza de reacción con relación a las articulaciones de rodilla, tobillo y cadera (Fig. 5). Así puede verse la forma en que actúa y qué tan adecuada resulta ser para el patrón de marcha. El vectograma de fuerzas generado por algunos programas presenta también información importante sobre el comportamiento de la fuerza de reacción durante toda la fase de apoyo, como lo muestra la Fig. 6.

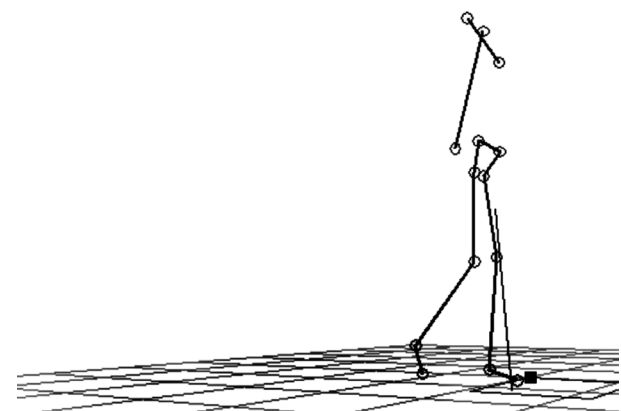
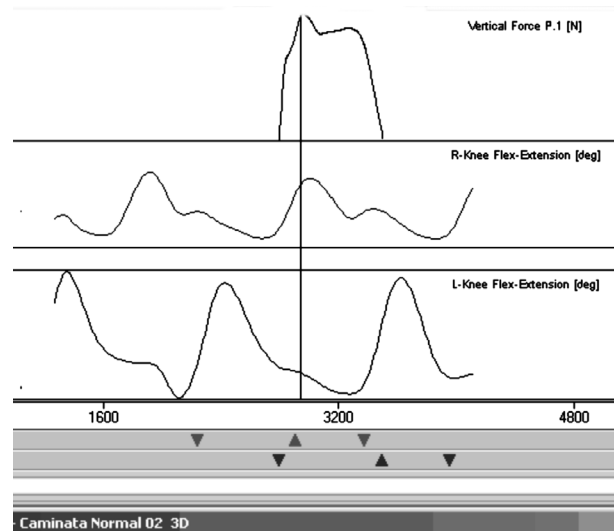


Fig. 4. Visualización simultánea de las gráficas 2D, el modelo 3D y los eventos principales de la marcha, obtenida con el software GaitEliclinic® V. 2.9.

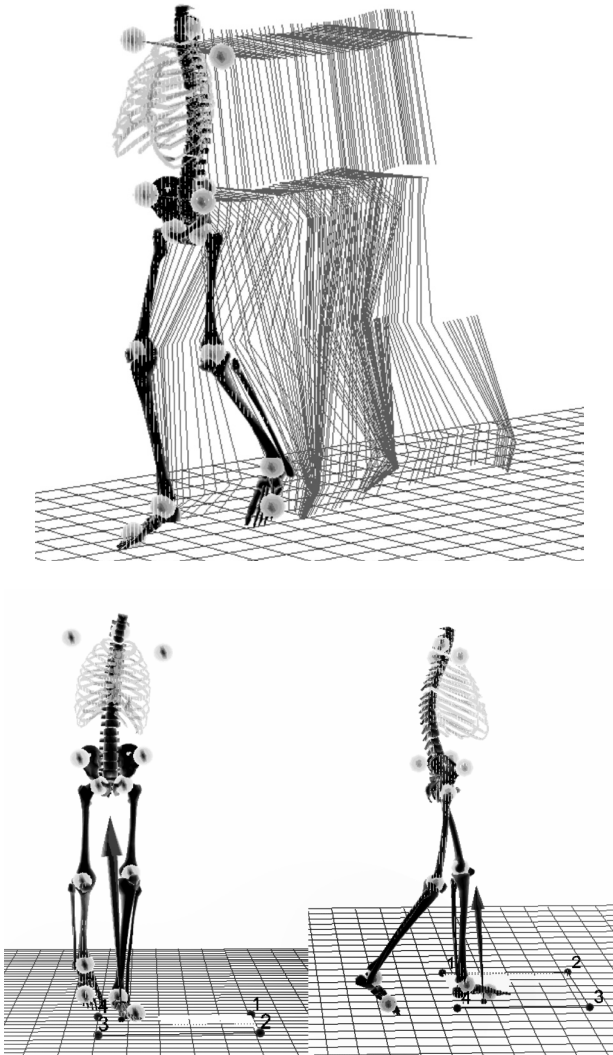


Fig. 5. Diferentes ángulos de vista de la reconstrucción ósea 3D en el visualizador Viewer 3D®. El vector indica la reacción en la plataforma.

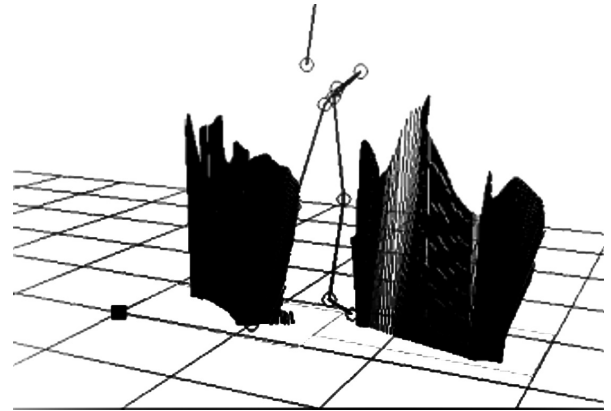


Fig. 6. Vectograma de fuerzas con la utilización de dos plataformas dinámicas, obtenido con el software GaitEliclinic® V. 2.9.

En algunas ocasiones los resultados obtenidos deben ser contrastados con las imágenes del paciente caminando (en video convencional, no con el modelo reconstruido), por esto usualmente los recorridos también son registrados con cámaras de video convencional. Otros programas, que analizan la marcha registrada con estas cámaras convencionales, pueden ser también de gran utilidad, como el Dartfish®, que evitan la utilización de marcadores (que son mas incómodos para los pacientes pues implican retirar la ropa para el estudio) y de cámaras infrarrojas [41]. Estos podrían ser utilizados bien como complemento a los sistemas infrarrojos o en lugar de estos. Estos programas tienen modos de visualización de gran utilidad para el análisis, como las opciones de pantalla dividida para visualizar simultáneamente recorridos en dos condiciones diferentes, la opción de *StroMotion* para ver varios pasos del mismo movimiento en una misma imagen (Fig. 7), entre otras. Además, estos permiten la obtención de medidas y realizar el seguimiento de marcadores virtuales ubicados sobre el video [41], aunque las gráficas de movimiento de estos marcadores no se obtienen con tanta precisión.



Fig. 7. Modos de visualización de Dartfish®. Izquierda: Modo de pantalla dividida, derecha: *StroMotion*. Tomado de [42].



### *Análisis comparativos*

Una aplicación importante del análisis de marcha en la práctica clínica es la posibilidad de realizar estudios comparativos, sea en diferentes tiempos (análisis longitudinales para evaluar recuperación o efectividad de la terapia), con diferentes condiciones (p. ej. con y sin ayudas técnicas), o con la combinación de ambos factores (p. ej. antes y después de una intervención quirúrgica o de la aplicación de toxina botulínica).

La periodicidad en que los estudios deben realizarse para el caso de análisis longitudinales es muy dependiente de las condiciones de cada laboratorio o paciente. Por ejemplo, para evaluar efectividad en las terapias de recuperación/rehabilitación, se debe tener en cuenta la periodicidad de las mismas y qué tan cercano se pretende que sea su seguimiento. Por su parte, para la realización de estudios comparativos en diferentes condiciones (con o sin caminadores, muletas u ortesis, entre otros), se deben realizar recorridos independientes para cada condición, pero dentro de la misma sesión de estudio, de modo que no se introduzcan variables adicionales para el análisis de los datos. Este tipo de estudios resultan ser una ayuda directa para determinar realmente qué tanto las ayudas mejoran el patrón de marcha.

### *Análisis complementarios con electromiografía*

La señal electromiográfica puede ser presentada en bruto, y con ésta es posible conocer la secuencia de activación muscular y por lo tanto analizar la efectividad funcional. Sin embargo, si se le realiza un procesamiento adicional a la señal se puede obtener la intensidad relativa del esfuerzo muscular. Este procesamiento consiste en la cuantificación y normalización de la señal de EMG, lo que permite generar otro tipo de gráficas de gran utilidad que no son siempre calculadas por los programas [18].

Las señales de EMG pueden ser presentadas de manera sincronizada con los eventos de la marcha, de modo que puede evaluarse la contribución de los diferentes grupos musculares según los movimientos articulares en cada fase del ciclo.

### *Análisis estadísticos e indicadores de la marcha*

Como se mencionó en la sección anterior, los parámetros son obtenidos en muchas ocasiones a partir de un solo ciclo de la marcha, sea por restricciones en el número de plataformas o en el largo del pasillo (el largo del pasillo no es sólo restricción para la cantidad de información cinemática, sino también para la cantidad de datos espaciotemporales y electromiográficos). Una alternativa para superar estas limitantes sería promediar los datos de diferentes recorridos dentro de la misma

sesión de estudio, tanto para el caso de las plataformas como del pasillo, o el procesamiento en ambas direcciones de progresión (camino de ida y de regreso) para el pasillo. Con la información de un mayor número de pasos sería posible tener otro tipo de información estadística como la desviación estándar en los parámetros, para tener una idea de la regularidad en la marcha. Además, los parámetros presentados se referirían a la media de varios ciclos, no de un solo ciclo que podría por algún motivo (interno al paciente, error del sistema o factor externo) no ser regular y típico del paciente. También sería útil la obtención de indicadores del grado de normalidad de la marcha, que, además de ser favorables para el diagnóstico y determinación de la severidad de la patología, permitiría encontrar parámetros cuantitativos del porcentaje de mejora al hacer estudios comparativos (en el tiempo o en diferentes condiciones) y llevar así registros de cuánto ayudan los diferentes tratamientos. Algunos parámetros estadísticos han sido reportados para estudiar qué tan repetible es el patrón y para comparar marchas normales y anormales. Entre los propuestos están el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de correlación múltiple (CMC), el análisis de Fourier y la técnica de *boot-strap* [14].

## V. CONCLUSIÓN

Los sistemas avanzados disponibles en la actualidad para realizar estudios de marcha, especialmente los que combinan técnicas de videogrametría, dinamometría y electromiografía, permiten la obtención de parámetros representativos de la marcha de forma cuantitativa, objetiva y eficaz. Aunque estos sistemas proveen las herramientas y guían los procesos para realizar los estudios adecuadamente, algunos aspectos deben ser considerados desde la etapa de planeación y configuración del laboratorio (antes de la adquisición de los equipos o de la definición del espacio). Algunos otros aspectos que ayudan a obtener mejores resultados sólo son evidenciados durante la práctica, donde se notan diferencias significativas entre los resultados que se espera obtener y aquellos que realmente se obtienen. Un ejemplo de esto es el caso de pacientes de baja estatura que no son tan bien identificados por las cámaras como los pacientes de estaturas mayores, por lo que se requiere una calibración cuidadosa y suficiente espacio (pista) para la adquisición. En igual medida, consideraciones relacionadas con la colocación de marcadores y la cantidad y uso de plataformas de fuerzas deben ser tenidas en cuenta durante el proceso, así como aquellas relacionadas con el análisis de los resultados. Entre estas últimas están los diferentes modos de visualización y presentación de los parámetros, la realización de estudios comparativos, el análisis de complementos electromiográficos y el uso de estadísticas e indicadores.

Este documento puede ser utilizado como una ayuda importante para definir la configuración, los procesos de adquisición y análisis en estudios de marcha, al presentar consideraciones analizadas tanto desde el punto de vista teórico, partiendo de revisiones bibliográficas, como desde lo práctico, partiendo de la experiencia directa con pacientes. La importancia o jerarquía de los aspectos mencionados no puede ser generalizada, ya que depende de las características de cada paciente, y las necesidades y características de cada laboratorio. Los aspectos considerados aquí pueden servir como guía para que en cada circunstancia se prioricen aquellos que se considere serán de mayor influencia en los resultados.

Si bien en algunos aspectos se presentan puntos de discusión abiertos (sin ser resueltos), como el caso del posicionamiento de los marcadores (una de las mayores dificultades y fuentes de error), se debe tener en cuenta que esto es algo común en los sistemas de análisis que se utilizan actualmente en la práctica, aunque varias soluciones se encuentran en fase de desarrollo. La necesidad de nuevos desarrollos en este campo es justificada por la gran difusión que están teniendo estas técnicas de estudio, entre ellos los métodos para reducir subjetividad en los análisis y obtener mejores estadísticas de los estudios, aunque los sistemas actuales permiten un desempeño aceptable y bastante útil en la práctica.

#### AGRADECIMIENTO

Al Centro de Rehabilitación Infantil Teletón por abrir los espacios para la utilización de la ciencia y la tecnología al servicio de las personas en situación de discapacidad, y por proveer y actualizar las herramientas necesarias para el mejoramiento de los métodos de diagnóstico y tratamiento, de manera especial en el laboratorio de análisis de movimiento.

#### REFERENCIAS

- [1] Collado S. Análisis de la Marcha Humana con Plataformas dinamométricas. Influencia en el transporte de cargas. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 2002.
- [2] Sweeting K., Mock M. Gait and posture. Assessment in general practice. *Australian Family Physician*, 36, 398-405, June 2007.
- [3] Vismara L., Romei M., Galli M, Montesano A, Baccalaro G., Crivellini M, Grugni G. Clinical implications of gait analysis in the rehabilitation of adult patients with “Prader-Willi” Syndrome: a cross-sectional comparative study (“Prader-Willi” Syndrome vs matched obese patients and healthy subjects). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4, May 2007.
- [4] Van Iersel M. B., Haitsma A., Olde Rikkert M. G. M., MD, Benraad C. E. M. Quantitative gait analysis to detect gait disorders in geriatric patients with depression. *Journal of the American Geriatric Society*, 53, 1441-1442, August 2005.
- [5] Papadonikolakis A. S., Vekris M. D., Korompilias A. V., Kostas J. P., Ristanis S. E., Soucacos P. N. Botulinum A toxin for treatment of lower limb spasticity in cerebral palsy. Gait analysis in 49 patients. *Acta Orthop Scand*, 74, 749-755, 2003.
- [6] Rousseaux M., Launay M. J., Kozlowski O., Daveluy W. Botulinum toxin injection in patients with hereditary spastic paraparesis. *European Journal of Neurology*, 14, 206-212, 2007
- [7] Patrick J.H. The Case for gait analysis as part of the management of incomplete spinal cord injury. *Spinal Cord*, 41, 479-482, 2003.
- [8] Collins M. M. Validation of a Protocol for Motion Analysis. Consultado el 10 de febrero de 2008 en: <http://forms.gradsch.psu.edu/equity/mcnair/2003/collins.pdf>
- [9] Tenore N., Fortugno F., Viola F., Galli M., Giaquinto S. Gait Analysis as a Reliable Tool for Rehabilitation of Chronic Hemiplegic Patients. *Clinical and Experimental Hypertension*, 28, 349-355, 2006.
- [10] Astephen J. L., Deluzio K. J. A multivariate gait data analysis technique: application to knee osteoarthritis. *Proc. Instn Mech. Engrs*, 218, 271-279, 2004.
- [11] Bartlett R. Introduction to Sports Biomechanics. Taylor & Francis. Part II, 161-281, 1997.
- [12] Datta D., Heller B., Howitt J. A comparative evaluation of oxygen consumption and gait pattern in amputees using Intelligent Prostheses and conventionally damped knee swing-phase control. *Clinical Rehabilitation*, 19, 398-403, 2005.
- [13] Franceschini M., Massucci M., Ferrari L., Agosti M., Paroli C. Effects of an ankle-foot orthosis on spatiotemporal parameters and energy cost of hemiparetic gait. *Clinical Rehabilitation*, 17, 368-372, 2003.
- [14] Benedetti M. G., Catani F., Leardini A., Pignotti E., Giannini S. Data management in gait analysis for clinical applications. *Clinical Biomechanics*, 13, 204-215, 1998.
- [15] Instituto de Biomecánica de Valencia. Kinescan (2006). Consultado el 15 de febrero de 2008 en: [http://www.ibv.org/Shop/usuario/productos/IBV/fichaproducto21\\_aplicaciones.asp?IdProducto=1157](http://www.ibv.org/Shop/usuario/productos/IBV/fichaproducto21_aplicaciones.asp?IdProducto=1157)
- [16] Universidad de los Andes. Instituto de ortopedia infantil Roosvelt. Laboratorio para el análisis de movimiento (2007). Consultado el 10 de febrero de 2008 en: <http://laboratorio-marcha.uniandes.edu.co/marcha.htm>
- [17] Clayton H. M., Schamhardt H. C. **Measurement Techniques for Gait Analysis**. Consultado el 15 de enero de 2008 en: [http://www.bertec.com/publications/research/papers\\_products/Clayton-Equin e%20Locomotion%20Book%20Chapter%20ISBN070202483.pdf](http://www.bertec.com/publications/research/papers_products/Clayton-Equin e%20Locomotion%20Book%20Chapter%20ISBN070202483.pdf)
- [18] Prat J. M., Sánchez-Lacuesta, J. Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Instituto de Biomecánica de Valencia. IMPIVA Generalitat Valenciana, 2002.
- [19] Perry J. **Gait Analysis: Normal and Pathological function**. SLACK Incorporated, 1992. Sección 2, 49-167.
- [20] Baker R. Gait analysis methods in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 3, March 2006.
- [21] The Nemours foundation. EMG (2007). Consultado el 20 de enero de 2008 en: [http://www.kidshealth.org/PageManager.jsp?dn=nemours&article\\_set=25139&lic=60&cat\\_id=128](http://www.kidshealth.org/PageManager.jsp?dn=nemours&article_set=25139&lic=60&cat_id=128)
- [22] Turani N., Kemikszoglu A., Karatas M., Ozker R. Assessment of hemiplegic gait using the Wisconsin Gait Scale. *Scand J Caring Sci*, 18, 103-108, 2004.

- [23] Díaz C. A., Torres A., Ramírez J. I., García L. F., Álvarez N. Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones. *CineMED. Revista EIA*, 5, 85-92, Junio 2006.
- [24] Kawamura C.M., de Morais Filho M.C., Barreto M.M., de Paula Asa S.K., Juliano Y., Novo N.F. Comparison between visual and three-dimensional gait analysis in patients with spastic diplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*, 25, 18-24, January 2007.
- [25] Center for Gait and Motion análisis. Gillete Children's Specialty Healthcare. How it works. Follow up evaluation (2007). Consultado el 9 de febrero de 2008 en:  
<http://www.gillettechildrens.org/default.cfm?PID=1.3.9.4.10>
- [26] Chester V. L., Tingley M., Biden E. N. Comparison of two normative paediatric gait databases. *Dynamic Medicine*, 6, July 2007.
- [27] Davis RB, Ounpuu S, Tybursky D, Gage JR. A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Mov Sci*, 10, 1991.
- [28] Robertson D.G.E., Caldwell G.E., Hamill J., Kamen G., Whittlesey S.N. Research and methods in biomechanics. Cap 2, 35-52, 2004.
- [29] Benoit D.L., Ramsey D.K., Lamontagne M., Xu L., Wretenberg P., Renstrom P. Effect of skin movement artifact on knee kinematics during gait and cutting motions measured in vivo. *Gait & Posture*, 24, 152-164, October 2006.
- [30] Sudhoff I., Van Driessche S., Laporte S., de Guise J.A., Skalli W. Comparing three attachment systems used to determine knee kinematics during gait. *Gait & Posture*, 25, 533-543, April 2007.
- [31] Westhoff B., Hirsch M.A., Hefter H., Wild A., Krauspe R. How reliable are data from 3D-gait analysis. *Sportverletz Sportschaden*, 18, 76-79, June 2004.
- [32] Leardini A., Benedetti M.G., Natio R., Berti L., Giannini S. Designing experimental protocols for routine clinical gait analysis: exemplary cases on lower limb and foot multi-segmental analysis. Consultado el 13 de febrero de 2008 en: <http://www.univ-valenciennes.fr/congres/3D2006/Abstracts/126-Leardini.pdf>
- [33] Braidot A., Cian L., Cherniz A., Gallardo D., Spinetto J. Desarrollo de un sistema de viodografía digital para análisis de la marcha. *Memorias II congreso latinoamericano de ingeniería biomédica*, La Habana, Cuba, 2001.
- [34] Villalobos J., Parodi A., González R. Estandarización de valores cinemáticos en niños sanos. *Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación*, 17, 47-53, 2005.
- [35] Oberg T., Karsznia A., Oberg K. Basic gait parameters: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 30, 210-223, 1993.
- [36] Derby Hospitals. NHS Foundation Trust. Derby Gait and Movement Laboratory. Introduction. Consultado el 20 de enero de 2008 en: <http://www.gait.com/introduction.htm>
- [37] University of Nebraska Medical Center Munroe-Meyer Institute for genetics and rehabilitation. Motion Analysis Laboratory (2007). Consultado el 20 de enero de 2008 en: <http://www.unmc.edu/dept/mmi/index.cfm?CONREF=16>
- [38] University of Virginia Health System. Physical Medicine and Rehabilitation. Gait and Motion analysis laboratory (2007). Consultado el 20 de enero de 2008 en: <http://www.healthsystem.virginia.edu/internet/pmr/GaitLab.cfm>
- [39] Alton F., Baldey L., Caplan S., Morrissey M.C. A kinematic comparison of overground and treadmill walking. *Clinical Biomechanics*, 13, 434-440, September 1998.
- [40] Watelain E., Froger J., Rousseaux M., Lensel G., Barbier F., Lepoutre F., Thevenon A. Variability of video-based clinical gait analysis in hemiplegia as performed by practitioners in diverse specialties. *J Rehabil Med*, 37, 317-324, 2005.
- [41] Dartfish. Video software solutions. Software (2007). Consultado el 16 de febrero de 2008 en: <http://www.dartfish.com/en/software/index.htm>
- [42] Dartfish. Video software solutions. Media Gallery (2007). Consultado el 16 de febrero de 2008 en: <http://www.dartfish.com/en/media-gallery/videos/index.htm>