

INVESTIGACIÓN ORIGINAL

Caracterización de variables cinemáticas de la marcha humana mediante un sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas: parámetros angulares de rodilla

Characterization of cinematic variables in human gait by a computerized system for capturing subaquatic images: knee angular parameters

Mauricio Hernando Valencia¹ • José Henry Osorio^{2,3}

Recibido: 26/08/2013 / Aceptado: 17/3/2014

¹ Centro de Rehabilitación Integral Teletón. Manizales, Colombia.

² Laboratorio de Investigación en Bioquímica Clínica y Patología Molecular, Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

³ Universidad de Manizales. Manizales, Colombia.

Correspondencia: José Henry Osorio. Dirección: Universidad de Caldas. Calle 65 No. 26-10. Universidad de Manizales. Manizales Colombia. Correo electrónico: jose.osorio_o@ucaldas.edu.co

[| Resumen |](#)

Antecedentes. El proceso de ejecución de las terapias en el agua, realizadas en varios centros de rehabilitación en el entorno nacional e internacional, requiere de un sistema de medición.

Objetivo. Validar la posibilidad de cuantificar las variables cinemáticas de la marcha humana, en individuos sanos, usando video fotogrametría como sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas con registro en plano sagital.

Materiales y métodos. Mediante un sistema robótico que consta de un sistema de cadena y una plataforma móvil en el piso del tanque de marcha, que ajusta la posición final de la cámara submarina, se realizó análisis de la marcha y posterior cálculo de los ángulos articulares en ambiente acuático de cuatro individuos voluntarios.

Resultados. El ángulo filtrado de flexión de la rodilla durante la fase de balanceo en el ciclo de marcha subacuática es mayor en el género masculino ($52,2 \pm 9,7$) que en el femenino ($45,6 \pm 7,0$). El ángulo filtrado de flexión de la rodilla durante la fase de apoyo en el ciclo de marcha subacuática es mayor en el género masculino ($1,6 \pm 1,5$) que en el femenino ($0,1 \pm 0,01$).

Conclusiones. Se pueden cuantificar las variables cinemáticas de la marcha humana (parámetros angulares de la rodilla), en individuos sanos, usando video fotogrametría como sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas, en el tanque de marcha.

Palabras clave: Marcha, Rodilla, Movimiento (Física) (DeCS).

Valencia MH, Osorio JH. Caracterización de variables cinemáticas de la marcha humana mediante un sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas: parámetros angulares de rodilla. Rev Fac Med. 2014;62:71-79.

Summary

Background. The implementation of water therapies, performed in several rehabilitation centers in the national and international environment, requires a measurement system.

Objective. To validate the possibility of quantitation of kinematic variables of human gait, in healthy individuals, using video-photogrammetry as a computerized system for capturing subaquatic images with sagittal plane registration.

Materials and methods. By the use of a robotic system (made of a chain and mobile platform system on the floor of gait tank, which adjust the final position of sub-aquatic camera), it was performed gait analysis and calculi of joint angles in aquatic environment of four voluntary persons.

Results. The filtrated flexion angle of knee during the rocking phase in the sub-aquatic gait cycle is higher in masculine gender (52.2 ± 9.7) than in the feminine one (45.6 ± 7.0). The filtrated flexion angle of knee during the stance phase, in the subaquatic

gait cycle is higher in masculine gender (1.6 ± 1.5) than in the feminine one (0.1 ± 0.01).

Conclusions. It is possible to quantify the kinematic variables of human gait (knee angular parameters), in healthy individuals, using video-photogrammetry as a computerized system for capturing subaquatic images in the gait tank.

Key words: Gait, Knee, Motion (MeSH).

Valencia MH, Osorio JH. Characterization of cinematic variables in human gait by a computerized system for capturing subaquatic images: knee angular parameters. Rev Fac Med. 2014;62:71-79.

Introducción

Se ha investigado el proceso de ejecución de las terapias en el agua adelantadas en varios centros de rehabilitación en el entorno nacional e internacional, y no se ha definido un modelo o un sistema de medición de esta herramienta en rehabilitación (1). Teniendo en cuenta que la terapia física y los procesos de rehabilitación deben tener un punto de apoyo en datos mensurables y observacionales objetivos, y que hay pocos estudios que vinculen variables biomecánicas en el medio acuático, el presente estudio analiza el movimiento de personas sanas en el medio acuático a través de los parámetros cinemáticos angulares de rodilla en las fases y subfases de la marcha.

Esto se realizó a través del uso de un sistema electrónico para medir variables biomecánicas, a partir de un sistema de imágenes digitalizadas adquiridas en el tanque de marcha. De esta manera, se contribuye con la promoción de los conocimientos existentes sobre el tema propuesto y, al mismo tiempo, se determina si el tanque de marcha es una herramienta de evaluación en personas que necesitan la recuperación cinética funcional de la marcha.

En este estudio se revisaron las publicaciones más relevantes y recientes utilizando las palabras y términos MeSH: “Hydrotherapy”, “water therapy”, “march”, “gait”, “underwater”, “goes underwater”, “Kinematics”, “measurements”, “computerized system”, “underwater image capture”, “videogrametría” en las bases de datos MEDLINE, PUBMED y COCHRANE. Se encontraron 32 artículos relacionados con hidroterapia y manejo de algunas patologías neuromusculares y osteoarticulares; pocos artículos fueron fundamentados en parámetros biomecánicos y solo cinco publicaciones relacionadas con la evaluación de la marcha subacuática (11-14,16), lo que confirma la importancia de este tipo de estudios.

Las investigaciones antes mencionadas son analizadas y comparadas con los hallazgos del presente trabajo en la discusión del presente artículo. El fin de este estudio fue validar la posibilidad de cuantificar las variables cinemáticas de la marcha humana, en individuos sanos, usando video fotogrametría como sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas con registro en plano sagital.

Materiales y métodos

Este estudio fue realizado en el tanque de marcha del área de hidroterapia de la Clínica Universidad de la Sabana, en Chía, Cundinamarca, Colombia, en 2012. Es un estudio descriptivo en el que participaron cuatro individuos voluntarios (dos mujeres y dos hombres) mayores de 18 años, quienes firmaron libremente el consentimiento informado. Con base en el artículo 5 del capítulo 1 de la Resolución 8430 del 4 de octubre de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia (actualmente Ministerio de la Protección Social) sobre los aspectos éticos de la investigación en seres humanos, en este trabajo prevalece el criterio del respeto a la dignidad, protección de los derechos y el bienestar humano.

Este trabajo se clasifica como investigación con riesgo mínimo que emplea el registro de datos a través de dos procedimientos comunes: una fase inicial de examen físico general y toma de medidas angulares de miembros inferiores, a través de un goniómetro; y una segunda fase en la que se aplican unas marcas autoadhesivas en los miembros inferiores del individuo, que luego es filmado al caminar por un pasillo sumergido en agua hasta el nivel del apéndice xifoides. El proceso estuvo monitorizado por el grupo de Monitoria Clínica de la Universidad de La Sabana, para garantía de la calidad de la información y el cumplimiento de las normas de buenas prácticas clínicas.

Los criterios de inclusión del presente trabajo fueron individuos adultos jóvenes sanos, mayores de 18 años, que participaron de manera voluntaria y firmaron el consentimiento informado. Los criterios de exclusión fueron las contraindicaciones relativas y absolutas para permanecer en ambiente acuático previstas por la literatura, a saber: presencia de heridas abiertas, procesos infecciosos o inflamatorios agudos, hipertensión arterial no controlada, alteraciones cardíacas o pulmonares en períodos no estables, insuficiencias orgánicas en períodos de descompensación (2,3), mal estado general, pacientes desorientados, epilepsia no controlada, diabetes no controlada y tuberculosis (4,5), así como personas con alteraciones del patrón de marcha, con limitaciones físicas de los sistemas óseo, muscular, articular, nervioso y cardiopulmonar diagnosticados (6).

Para la recolección de los datos, los sujetos fueron sometidos inicialmente a una selección denominada fase I, a través de una entrevista y un examen físico general. Los sujetos seleccionados fueron sometidos a un análisis clínico observacional de la marcha en ambiente terrestre, por el médico residente de fisioterapia en la fase II. Los sujetos seleccionados fueron sometidos a un análisis cinemático de la marcha en ambiente acuático en la fase III. Para la selección de los sujetos se utilizó una ficha de evaluación elaborada para el estudio. Se analizaron 4 individuos adultos sanos sin antecedentes patológicos así:

- Individuo uno: género femenino, edad 21 años, dominancia cerebral izquierda, peso de 58 kg, talla 1,70 m, IMC: 20,06 Kg/m², con signos vitales estables (T/A 110/70 mm de Hg brazo derecho sentado y 110/70 mm de Hg brazo derecho en bípedo, frecuencia cardíaca 76xminuto, frecuencia respiratoria 16xminuto).
- Individuo dos: género femenino, edad 30 años, dominancia cerebral izquierda, peso de 65 kg, talla 1,68 m, IMC: 23,04 Kg/m², con signos vitales estables (T/A 120/70 mm de Hg brazo derecho sentado y 115/70 mm de Hg brazo derecho en bípedo, frecuencia cardíaca 72xminuto, frecuencia respiratoria 16xminuto).
- Individuo tres: género masculino, edad 26 años, dominancia cerebral derecha, peso de 72 kg, talla 1,70 m, IMC: 24,91 Kg/m², con signos vitales estables (T/A 110/80 mm de Hg brazo derecho sentado y 110/70 mm de Hg brazo derecho en bípedo, frecuencia cardíaca 70xminuto, frecuencia respiratoria 18xminuto).
- Individuo cuatro: género masculino, edad 38 años, dominancia cerebral izquierda, peso de 82 kg, talla 1,76 m, IMC: 26,47 Kg/m², con signos vitales estables (T/A 130/80 mm de Hg brazo derecho sentado y 130/80 mm de Hg brazo derecho en bípedo, frecuencia cardíaca 80xminuto, frecuencia respiratoria 18xminuto).

Para la evaluación de la fuerza muscular se utilizó la escala de fuerza muscular del Medical Research Council del Reino Unido y los 4 individuos examinados tuvieron una fuerza muscular de 5/5 en los miotomas examinados.

Análisis de la marcha y posterior cálculo de los ángulos articulares en ambiente acuático

se marcaron puntos anatómicos en el miembro inferior derecho de cada individuo a través de marcadores pasivos ubicados de acuerdo con el modelo bidimensional de cuatro segmentos (7). El miembro inferior fue dividido en tres segmentos: cadera, pierna y pie. Los segmentos fueron delimitados por puntos localizados en estructuras anatómicas:

cóndilo femoral lateral y maléolo lateral. Los puntos fueron referenciados en un mismo sistema de coordenadas (8). Los marcadores utilizados fueron circulares de 3,5 cm de diámetro, de color amarillo con borde negro, impermeables, fijados a las superficies articulares y puntos de referencia con velcro (Figura 1).

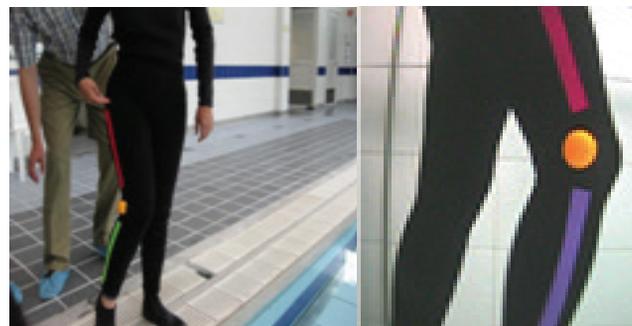


Figura 1. Análisis de la marcha y posterior cálculo de los ángulos articulares en ambiente acuático. Fuente: autores.

Nota: se marcaron puntos anatómicos en el miembro inferior derecho de cada individuo a través de marcadores pasivos ubicados de acuerdo con el modelo bidimensional de cuatro segmentos.

Los cuatro individuos fueron sumergidos hasta el nivel de los apéndices xifoides y posteriormente analizados de manera individual en el tanque de marcha. Para la evaluación de los ángulos de movimiento, se filmó al sujeto en movimiento en el plano sagital, se le pidió que caminara a una velocidad constante y cómoda para él, a través del tanque de marcha, donde se ubicó un eje robótico que permitió el movimiento horizontal y vertical de una cámara subacuática adjunta; la cámara captó la secuencia de imágenes, que posteriormente se analizaron para el cálculo del ángulo de la rodilla, así como su variación durante las fases y subfases de la marcha subacuática. En cada individuo se realizaron 5 secuencias de filmación de la rodilla derecha durante cuatro pasos en el tanque de marcha.

Sistema robótico

consta de un sistema de cadena y una plataforma móvil en el piso del tanque, que ajusta la posición final de la cámara submarina (Figura 2a). El equipo tiene 4 metros de longitud y un ancho de 1,5 metros; hay un espacio de 15 cm de ancho entre la pared de la piscina y barras de soporte lateral. La cámara es compatible con una plataforma sobre el robot; se ubicó entre la pared de la piscina y barras de soporte lateral (Figura 2b). Para el movimiento de la cámara de video se utilizó un sistema de cadena y tren que arrastra la cadena en sus enlaces (Figura 3).

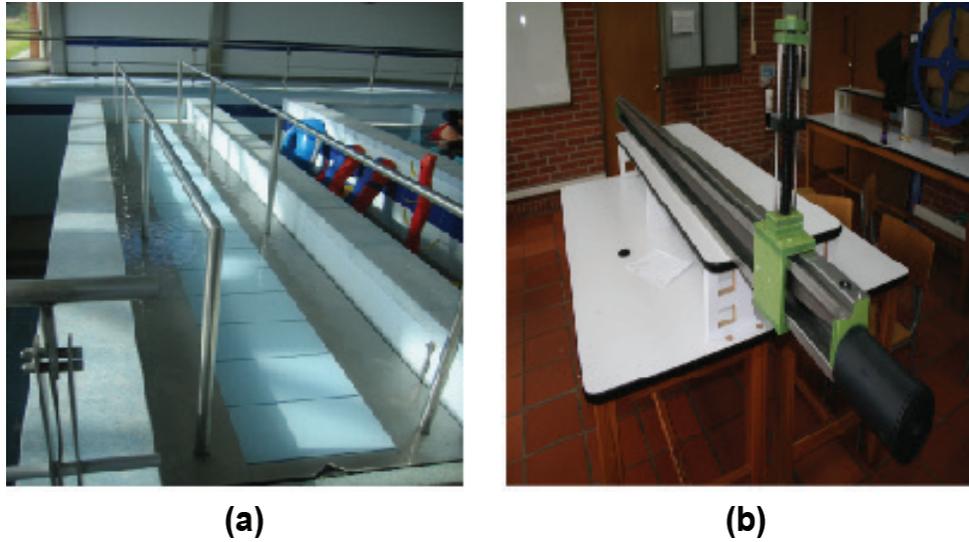


Figura 2. Sistema robótico empleado en el presente estudio. Fuente: autores.
Nota: a. Tanque de marcha. b. Eje del robot.

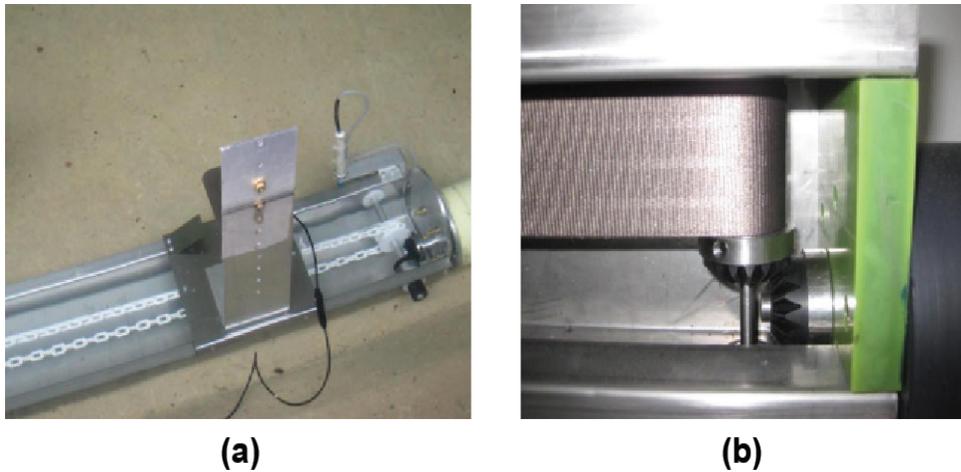


Figura 3. Prototipos utilizados para el movimiento de la cámara de video. Fuente: autores.
Nota: el primer prototipo (a) consta de un sistema de cadena y tren que arrastra la cadena en sus enlaces. El segundo (b) consiste en un rodillo de banda de hilo sintético que permite que el motor esté totalmente aislado por una caja especial y un retén mecánico para arrastrar la plataforma que sostiene la cámara. En este estudio se utilizó el sistema de cadena y tren que arrastra la cadena (a).

La herramienta desarrollada está constituida por un eje robótico que permite el movimiento horizontal y vertical de una cámara subacuática acoplada a él; el sistema realiza el seguimiento de la persona dentro del tanque de marcha, y la adquisición de la secuencia de imágenes que posteriormente se procesa para obtener el cálculo del ángulo de la rodilla, así como su variación en el tiempo. El sistema mecánico del eje robótico está compuesto por un actuador (motor), un sistema de transmisión por engranaje-cadena y una plataforma móvil en el piso del tanque que ajusta la posición final de la cámara

subacuática. El sistema es controlado electrónicamente con una palanca de mando.

El controlador está basado en un micro controlador comercial y el sistema de visión consiste en un casco cámara análogo submarino, con un objetivo de 2,6 mm, con 120 grados de alcance angular óptico; también consta de una cámara con una resolución de 240.480 Píxeles, es decir una resolución de 112.5 Kilo Píxeles, y con una velocidad de la Cámara de 30 cuadros por segundo (Figura 4).

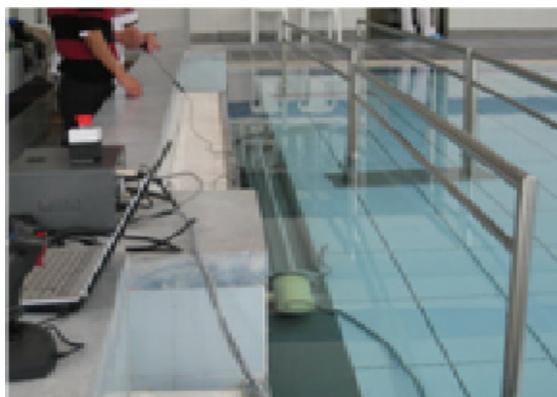


Figura 4. Equipo para captura y digitalización de la secuencia de imágenes. Fuente: autores.

El voltaje de alimentación es de 12 V. La captura y digitalización de la secuencia de imágenes se realiza a través de un importador de tarjeta de vídeo Pinnacle, que transmite la información a un computador portátil mediante el puerto USB. El almacenamiento de información de vídeo en formato AVI es inicialmente en el equipo y, a continuación, en una unidad externa y portable.

Procesamiento del video y cálculo del ángulo de la rodilla

Lo realiza un Software con lenguaje C#.net. Se utilizaron como bibliotecas adicionales para el tratamiento de la imagen el Aforge.Net (9). El sistema permite grabar en video lo que se adquiere por la cámara y, a partir de estos videos, se puede hacer análisis del ángulo entre 3 marcadores, ya sea de manera manual o automática. También es posible revisar los videos grabados cuadro por cuadro. Se diseñó un algoritmo de procesamiento para el protocolo de adquisición de imágenes. Este algoritmo se basa en un método automático para el cálculo de la variación del ángulo de la rodilla, que consiste en una etapa de pre procesamiento de la secuencia de imágenes, otra de segmentación de los marcadores pasivos del eje central de la pierna, seguido del procesamiento basado en morfología matemática y, finalmente, la etapa de cálculo del ángulo.

Manejo de datos

Fueron utilizados Microsoft Excel y Minitab Statistical Software.

Resultados

Se evaluaron 10 ciclos de marcha sobre la banda por persona como número de ciclos válidos, sumergidos hasta

el nivel del apéndice xifoides y 5 capturas por sesión y movimiento para cada uno. Con recorridos de 4 metros, durante 10 segundos, con velocidad de paso determinado por condiciones de 'comodidad' otorgadas por cada individuo para las cinco pruebas. También se tuvo en cuenta un desentrelazado de 30 fotogramas por segundo, logrando la digitalización de marcadores superficiales con mayor precisión por medio del sistema utilizado; se exportaron datos cinemáticos (duración del paso, rangos de movimiento por segmentos corporales) en proyección sobre el plano sagital para tres pasos con longitud completa.

Duración de paso

Se entiende como longitud de paso completo, la distancia lineal entre los sucesivos puntos de contacto del talón del mismo pie; la duración de paso será entendida, entonces, como el tiempo en que el individuo tarde en ejecutar esta acción. Se tomó como muestra la duración de paso completa (DPC) de tres recorridos en 5 pruebas, con criterio de velocidad 'cómoda' otorgada por cada sujeto y se marcó el tiempo en segundos. Para estas condiciones, se encontraron duraciones de paso en segundos, con valores mínimos (media 1,81) y máximos (media 4,16) en el género femenino para realizar un paso completo en condiciones subacuáticas; por otra parte, valores medianos 'aproximados' en el masculino (media 2,64-2,24). El 100% de los datos obtenidos para rodilla cuentan con confiabilidad estadística representada con $P < 0,05$.

Comportamiento de la rodilla en individuo femenino 1—ángulo filtración ($P < 0,05$) (pruebas 1 a 5)

Según datos recogidos en el análisis dinámico se pudo inferir que el primer paso difiere de los subsiguientes, con registros menores al segundo y al tercero, con hipótesis de variables externas influyentes (entre otras acomodación, potencia, resistencia); además, que el comportamiento del segundo y tercer paso son similares para cada una de las pruebas. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en la fase de balanceo en grados, mostró una media de 37,66, con valor mínimo de 24,32 en prueba 5 paso 1 y máximo de 51,64 en prueba 2 paso 3, (Tabla 1). Existe un patrón predominante entre pasos 1 a 3, señalando flexiones mínimas del ángulo de la rodilla en el paso 1 frente los pasos 2 y 3. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en la fase de apoyo en grados, cuenta con una media de 4,65, con valor mínimo de 0 y máximo de 5,83 en prueba 5 paso 2.

Tabla 1. Comportamiento de la rodilla en individuo femenino 1 – ángulo filtrado. Datos estadísticamente confiables: P-value < 0,05.

| RODILLA. Flexión en la fase de balance-ángulo filtrado | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| PASO | AF.P1 | AF.P2 | AF.P3 | AF.P4 | AF.P5 |
| 1 | 24,92 | 26,06 | 27,28 | 44,80 | 24,32 |
| 2 | 39,46 | 43,95 | 47,12 | 45,90 | 42,88 |
| 3 | 40,68 | 51,64 | 49,65 | 46,68 | 45,78 |

Comportamiento de la rodilla individuo femenino 2-ángulo filtrado (P-value<0,05) (pruebas 1 a 5)

Según datos recogidos en el análisis dinámico se puede inferir que el primer paso difiere de los subsiguientes, con registros menores al segundo y al tercero, con hipótesis de variables externas influyentes (entre otras acomodación, potencia, resistencia); además, que el comportamiento del segundo y tercer paso son similares para cada una de las pruebas. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en fase de balanceo en grados, cuenta con una media de 56,45, con valor mínimo de 42,77 en prueba 4 paso 1 y máximo de 57,33 en prueba 4 paso 2 (Tabla 2). Existe un patrón predominante entre pasos 1 a 3, señalando flexiones mínimas del ángulo de la rodilla en el paso 1 frente los pasos 2 y 3. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en fase de apoyo en grados, cuenta con una media de 0,17, con valor mínimo de 0 y máximo de 5,83 en prueba 5 paso 2. Existe un patrón predominante a la extensión completa del ángulo de la rodilla en la mayoría de las pruebas.

Tabla 2. Comportamiento de la rodilla individuo femenino 2-ángulo filtrado. Datos estadísticamente confiables: P-value<0,05.

| RODILLA. Flexión en la fase de balance-ángulo filtrado | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| PASO | AF.P1 | AF.P2 | AF.P3 | AF.P4 | AF.P5 |
| 1 | 45,10 | 44,80 | 47,94 | 42,77 | 57,41 |
| 2 | 52,98 | 51,16 | 55,60 | 57,33 | 56,36 |
| 3 | 47,82 | 49,45 | 55,54 | 53,75 | 55,59 |

Comportamiento de la rodilla individuo masculino 1-ángulo filtrado (P<0,05) (pruebas 1 a 5)

Según datos recogidos en el análisis dinámico se puede inferir que el primer paso difiere a los subsiguientes, con registros menores al segundo y al tercero, con hipótesis de variables externas influyentes (entre otras acomodación, potencia, resistencia); además, que el comportamiento del

segundo y tercer paso son similares para cada una de las pruebas. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en fase de balanceo en grados, cuenta con una media de 76,7, con valor mínimo de 19,35 en prueba 1 paso 1 y máximo de 92,83 en prueba 5 paso 2 (Tabla 3). Existe un patrón predominante entre pruebas 1-2 y 3-5, que señalan ángulos mínimos de flexión de la rodilla en las primeras y máximos en los segundos. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en fase de apoyo en grados, cuenta con una media de 4,65, con valor mínimo de 0 y máximo de 5,83 en prueba 5 paso 2.

Tabla 3. Comportamiento de la rodilla individuo masculino 1-ángulo filtrado. Datos estadísticamente confiables: P-value<0,05.

| RODILLA. Flexión en la fase de balance-ángulo filtrado | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| PASO | AF.P1 | AF.P2 | AF.P3 | AF.P4 | AF.P5 |
| 1 | 19,35 | 15,38 | 82,37 | 72,74 | 63,17 |
| 2 | 30,00 | 20,34 | 84,31 | 90,20 | 92,83 |
| 3 | 21,31 | 24,10 | 71,15 | 85,19 | 74,20 |

Comportamiento de la rodilla en individuo masculino 2-ángulo filtrado (P<0,05) (pruebas 1 a 5)

El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en la fase de balanceo en grados, cuenta con una media de 58,5, con valor mínimo de 35,18 en prueba 2 paso 1 y máximo de 86,71 en prueba 1 paso 3 (Tabla 4). Existe un patrón predominante en ángulo de flexión de rodilla entre pasos 3-5 en comparación con pasos 1-2. El rango de movimiento para la flexión de rodilla de ángulo filtrado en fase de apoyo en grados, cuenta con una media de 0,59, con valor mínimo de 0 y máximo de 3,70 en prueba 2 paso 2.

Tabla 4. Comportamiento de la rodilla en individuo masculino 2-ángulo filtrado. Datos estadísticamente confiables: P-value<0,05.

| RODILLA. Flexión en la fase de balance-ángulo filtrado | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| PASO | AF.P1 | AF.P2 | AF.P3 | AF.P4 | AF.P5 |
| 1 | 46,18 | 35,18 | 69,19 | 43,12 | 59,32 |
| 2 | 74,13 | 60,36 | 59,59 | 52,49 | 56,07 |
| 3 | 86,71 | 50,11 | 64,39 | 67,73 | 60,12 |

Discusión

La terapia acuática ha sido utilizada en los procesos de rehabilitación de personas con trastornos de la marcha desde hace muchos años y el uso del tanque de marcha es frecuente como herramienta de trabajo (10). Sin embargo, existe poca evidencia documentada sobre la evaluación objetiva de la

eficacia que tiene esta terapia en la recuperación de los pacientes. En Colombia, han sido pocas las investigaciones realizadas sobre el estudio de variables biomecánicas cuantitativas que permitan establecer la eficacia real y sustentada de los tratamientos realizados con hidroterapia.

En un estudio del 2004 se evaluaron las características de la marcha a diferentes velocidades en tierra y en agua, en 16 individuos adultos jóvenes sanos describiendo la actividad electromiográfica del Bíceps femoris y del Gluteus maximus, y haciendo mediciones cinemáticas y cinéticas (11). El objetivo de ese estudio fue identificar la función principal de los momentos articulares de la cadera, rodilla y tobillo, así como su contribución con la función de soporte y propulsión en la fase de apoyo y compararon los resultados de la marcha en agua con la marcha en tierra.

Se encontró que el momento de extensión de la rodilla al caminar en agua presenta un solo pico en la fase de apoyo, mientras que en tierra aparecen dos picos de extensión; el momento de extensión de cadera aparece siempre en la fase de apoyo en agua; el momento de extensión de cadera aumenta al incrementar velocidad de marcha en agua; la fuerza de impacto sobre la articulación de la rodilla se reduce drásticamente por la flotabilidad, pero aumenta con la velocidad de marcha, hallazgos confirmados en el presente trabajo.

Algunos autores, por medio del uso de marcadores corporales en el lado derecho del cuerpo, obtuvieron datos cinemáticos, duración del paso, velocidad de la marcha, tiempo de duración de la fase de apoyo, rangos de movimiento de segmentos corporales del tronco, pelvis, cadera, rodilla, tobillo y pie, así como datos cinéticos del componente vertical de la fuerza de reacción al piso en tierra y en agua (12). En la evaluación articular y de los ángulos evaluados, observaron que la articulación de la rodilla en agua presenta una reducida flexión durante los primeros 15° comparadas con la flexión en tierra, así como una mayor extensión en agua que en tierra durante la fase de soporte.

Otros examinaron los parámetros cinemáticos y cinéticos de la marcha en personas ancianas sanas (70±6 años) caminando en agua y en tierra y los compararon con un grupo de referencia de adultos jóvenes (29±6 años). Encontraron que en las personas más viejas caminando en tierra tienen menor longitud de zancada, velocidad más lenta del paso, valores más bajos de la fuerza de reacción al piso, impulsos horizontales superiores, rango menor del movimiento de la rodilla y dorsiflexión menor del tobillo (13). Cuando compararon la marcha subacuática de los ancianos con la de los adultos, encontraron que los ancianos caminaban

mucho más lentamente en la tierra que los adultos, pero ambos grupos presentaban la misma velocidad en el agua. Los ancianos presentan significativamente menor longitud y menor duración de zancada que los adultos más jóvenes en el agua. Así, las adaptaciones de las personas ancianas caminando en agua difieren de las del grupo de edad más joven. Este hecho debe considerarse cuando se prescriben programas de rehabilitación o de idoneidad para estas poblaciones (12).

En un estudio comparativo de los parámetros angulares de la marcha humana en ambiente acuático y terrestre en individuos adultos jóvenes sanos (14), se encontró que el apoyo inicial y el balanceo final en la extensión articular de la rodilla en ambiente terrestre es mayor que en el ambiente acuático.

Durante el balanceo inicial y medio, la flexión de la rodilla es mayor en ambiente acuático que en el terrestre. Los resultados obtenidos en esta investigación contrastan con los realizados por otros (15-18), que encontraron diferencias para el movimiento de la rodilla en agua cuando los comparan con el ambiente terrestre. Estos autores relatan que no hay apoyo inicial en ambiente acuático y la rodilla está en flexión.

Este estudio presenta diferencias con los resultados encontrados por otros (12), que no encontraron diferencias para el patrón de movimientos de la rodilla en ambiente acuático y terrestre, encontrando una flexión en ambiente acuático menor en relación con el ambiente terrestre durante los 15° iniciales del ciclo de la marcha y cuando compararon la flexión encontrada para la fase de balanceo medio, en agua la flexión también fue menor (12).

Mecánicamente, el aumento de la flexión de la rodilla que ocurre en el ambiente acuático promueve la disminución de la inercia angular y facilita una rotación del segmento de apoyo en la superficie, no siendo necesario realizar una dorsiflexión durante el apoyo inicial (19). La marcha en el medio acuático presenta diferencias significativas en relación con el comportamiento articular en sus fases y subfases, y con respecto a la marcha en ambiente terrestre, que deben ser consideradas durante la elaboración de un programa de tratamiento que utilice la hidroterapia como recurso.

En el medio acuático la articulación de la rodilla realiza extensión articular menor a la realizada en tierra y la articulación del tobillo realiza apoyo en el talón, permaneciendo en una posición neutra principalmente durante la fase de apoyo inicial (20). Dado que la marcha como es la forma de desplazamiento en posición bípeda propia del ser humano en la que se suceden apoyos

bipodales y los monopodales en un medio terrestre (21), estas diferencias pueden atribuirse al hecho de que el cuerpo humano adopta patrones de movimiento y diferentes estrategias motoras mientras camina en el medio acuático (22). Esto ocurre, probablemente, por la necesidad de adaptar el sistema sensorio-motriz al deambular en un medio con diferentes características físicas (23).

La falta de familiaridad y las condiciones ambientales impuestas por el medio líquido promueven adaptaciones al movimiento de la marcha en el medio acuático para así tener éxito en el nuevo entorno (24). En el presente trabajo se cuantificaron las variables cinemáticas de la marcha humana, de los parámetros angulares de rodilla y la duración de paso completo en el tanque de marcha, el 100% de los datos obtenidos para rodilla ($P\text{-Value}<0,05$), denotan registros estadísticos confiables obtenidos del sistema computarizado de captura durante el estudio. Se encuentran duraciones de paso en segundos con valores mínimos y máximos en el género femenino para realizar un paso completo en condiciones subacuáticas; en el masculino, se encontraron valores medianos “aproximados”.

Este estudio concluye que la marcha en el medio acuático presenta diferencias significativas en relación con el comportamiento articular en sus fases y subfases, con respecto a la marcha en ambiente terrestre, las cuales deben ser consideradas durante la elaboración de un programa de tratamiento que utilice la hidroterapia como recurso. El trabajo interprofesional entre Medicina de Rehabilitación e Ingeniería en busca de soluciones específicas, utilizando moderna infraestructura y equipos de terapia de rehabilitación mediante hidroterapia y, el diseño de un equipo robótico de captura de imágenes subacuáticas que permite medir los parámetros angulares de la rodilla y tobillo al deambular en el tanque de marcha, contribuyen con la promoción de conocimientos existentes sobre el tema propuesto y, al mismo tiempo, determina que el tanque de marcha es una herramienta de evaluación en las personas que necesitan la recuperación cinemática funcional de la marcha.

Conclusión

Según los resultados obtenidos, se valida la cuantificación de las variables cinemáticas de la marcha humana, en individuos sanos, usando video fotogrametría como sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas, en el tanque de marcha. El sistema robótico y el software utilizados, son sensibles para cuantificar las variables cinemáticas de la marcha humana, en individuos sanos, a diferentes velocidades de paso completo en el tanque de marcha. Se recomienda utilizar marcadores adheridos

a la piel en puntos anatómicos de referencia, como se menciona en el protocolo Davis, para evitar desplazamientos independientes.

El pasillo de cuatro metros es suficiente para realizar dos ciclos completos y el análisis se debería realizar sobre los dos pasos intermedios (un solo ciclo), de modo que no se incluya el paso inicial ni el final. Se debe adaptar un sistema de banda en el piso que permita una velocidad constante de paso completo para realizar una toma de video efectiva desde el primer paso.

Referencias

1. **Vega de Aramburu C, Días-Muñoz E, Camacho-Igual C.** Electroterapia, termoterapia e hidroterapia. Madrid: Editorial Síntesis S.A.; 2000.
2. **Aramburu de Vega C, Muñoz Días E, Igual Camacho C.** Electroterapia, termoterapia e hidroterapia. Madrid: Editorial Síntesis S.A.; 2000.
3. **Valenzuela A, Bacaicoa SM.** Curas balnearias y climáticas. Madrid: Ed Complutense Madrid; 1994.
4. **Bachman N, Robert M, Schleinkofer G M.** Hidroterapia Kneipp. Barcelona: Ed Integral; 1998.
5. **Gimeno H.** Hidroterapia y naturismo. Barcelona: Ed Integral; 1994.
6. **Viñas F.** Hidroterapia. Barcelona: Ed Integral; 1992.
7. **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. *J Neuroeng Rehabil.* 2007;4:14.
8. **Davis RB, Ounpuu S, Tybursky D, Gage JR.** A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science.* 1991;10:575-87.
9. Aforge.net. Disponible en: <http://www.aforgenet.com/>.
10. **Waller B, Munukka M, Multanen J, Rantalainen T, Pöyhönen T, Nieminen MT, et al.** Effects of a progressive aquatic resistance exercise program on the biochemical composition and morphology of cartilage in women with mild knee osteoarthritis: protocol for a randomised controlled trial. *BMC Musculoskeletal Disorders.* 2013;14:82.
11. **Miyoshi T, Shirota T, Yamamoto S, Nakazawa K, Akai M.** Functional roles of lower-limb joint moments while walking in water. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2005;20:194-201.
12. **Barela AM, Stolf SF, Duarte M.** Biomechanical characteristics of adults walking in shallow water and on land. *J Electromyogr Kinesiol.* 2006;16:250-6.
13. **Barela AM, Duarte M.** Biomechanical characteristics of elderly individuals walking on land and in water. *J Electromyogr Kinesiol.* 2008;18:446-54.
14. **Romanovitch D, Vera I, Ferretti E, Costa C.** Estudio comparativo de los parámetros angulares de la marcha humana en ambiente

- acuático y terrestre en individuos adultos jóvenes sanos. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*. 2007;13:14-22.
15. **Yamamoto S, Yano H, Nakasawa K.** Lower limb kinematics during walking in water. *Book of Abstracts XVth Congress ISB*; 1995. p. 1012-3.
16. **Ervilha UF.** Estudo da variação angular da articulação do joelho e do sinal eletromiográfico no domínio temporal durante a marcha humana em ambiente aquático. *Dissertação*. São Paulo: Escola de Educação Física e Esporte da Universidade de São Paulo; 1999.
17. **Miyoshi T, Shirota T, Yamamoto SI, Nakazawa K, Akaia M.** Effect of the walking speed to the lower limb joint angular displacements, joint moments and ground reaction force during walking in water. *Disabil Rehab*. 2004;26:724-32.
18. **Roper JA, Bressel E, Tillman MD.** Acute aquatic treadmill exercise improves gait and pain in people with knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2013;94:419-25.
19. **Barela AM, Duarte M.** Biomechanical characteristics of elderly individuals walking on land and in water. *J Electromyogr Kinesiol*. 2008;3:446-54.
20. **Osorio JH, Valencia MH.** Bases para el entendimiento del proceso de la marcha humana. *Archivos de Medicina (Manizales)*. 2013;13:88-96.
21. **Schutz G, Haupenthal A, Roesler H.** Estudio dinamométrico de la marcha humana en el medio acuático. *EF Deportes Revista Digital*. 2005;81:15-20.
22. **Avelar NC, Bastone AC, Alcântara MA, Gomes WF.** Effectiveness of aquatic and non-aquatic lower limb muscle endurance training in the static and dynamic balance of elderly people. *Rev Bras Fisioter*. 2010;14:229-36.
23. **Haupenthal A, Ruschel C, Hubert M, de Brito Fontana H, Roesler H.** Loading forces in shallow water running in two levels of immersion. *J Rehabil Med*. 2010;42:664-9.