

Influencia del calzado en el movimiento del pie durante la marcha y la carrera en niños y niñas de 6 y 7 años

Influence of footwear on foot movement during walking and running in boys and girls aged 6-7

Jose Luis López Elvira, Diego López Plaza, Alejandro López Valenciano, Carolina Alonso Montero

Universidad Miguel Hernández de Elche (España)

Resumen. La elección del calzado infantil durante el desarrollo del niño/a puede ser determinante en la aparición o prevención de problemas asociados con el pie por las diferentes características intrínsecas de los niños. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar los movimientos del pie durante el apoyo en marcha y carrera con y sin calzado. Participaron 12 niños y 12 niñas de primaria. El sistema de captura del movimiento Vicon fue utilizado para obtener variables cinemáticas del movimiento del pie. Los resultados mostraron una reducción significativa en la flexión en la articulación metatarsofalángica con calzado en ambos géneros y en ambas habilidades de en torno a 20° ($p < .05$ y tamaño del efecto alto), pudiendo asociarse a un mecanismo de protección. Así mismo se constató un aumento de la velocidad de caída del pie en carrera con calzado, especialmente en chicas, al contrario de la marcha, posiblemente por cambios en la técnica de pisada y/o características propias del calzado según el género. Por último, se encontró un desajuste en el eje de flexión de los metatarsos de aproximadamente 1 cm hacia la parte anterior del pie con calzado ($p < .05$ y tamaño del efecto alto), lo que lleva a recomendar que el diseño del calzado se ajuste con más precisión a la población que lo utiliza.

Palabras clave: cinemática, apoyo, Biomecánica, calzado infantil, 3D.

Abstract. The choice of children's shoes can be decisive in the appearance or prevention of problems associated with children's feet individual characteristics. Therefore, the aim of this study was to evaluate foot movements during the support phase of walking and running gait, with and without shoes. Twenty-four primary school students (12 boys and 12 girls) participated in the study. Vicon 3D motion analysis system was used to obtain foot kinematic variables. Results showed a significant decrease in the flexion of metatarsophalangeal joint with shoes in both genders in walking and running around 20° ($p < .05$ and high effect size), which can be associated with a protection mechanism. We also found an increased foot fall speed when running with shoes, especially in girls, but not in walking gait, probably due to changes in the technique and/or characteristics of the shoes according to gender. Finally, data show a 1-cm forward displacement of the metatarsal flexion axis with shoes ($p < .05$ and high effect size), which suggests that shoes design should be more accurately adapted to children population.

Keywords: kinematics, support, Biomechanics, children's footwear, 3D.

Introducción

El calzado infantil es un tema complejo de estudiar. Desde el punto de vista del individuo intervienen factores intrínsecos como el nivel de desarrollo o el sexo. Al mismo tiempo, desde el punto de vista del propio calzado, se ha demostrado su influencia sobre el pie y sobre la marcha, ya sea por su capacidad de amortiguación (Llana, Brizuela, Dura & García, 2002; O'Leary, Vorpahl & Heiderscheit, 2008), por el efecto asociado al diseño de la cazoleta y contrafuerte (Spears, Miller-Young, Sharma, Ker & Smith, 2007), la resiliencia de los materiales de la suela (Silva, Rodrigues, Pinto, Ferreira, Russo & Pereira, 2009), el punto de flexión de la suela (van der Zwaard, Vanwanseele, Holtkamp, van der Horst, Elders & Menz, 2014), el sistema de ajuste (Hagen & Hennig, 2009) o el efecto sensorial que tiene sobre la actividad muscular (Nurse, Hulliger, Wäkeling, Nigg & Stefánshyn, 2005). El calzado puede crear problemas en los pies debido a un ajuste inadecuado (Arlen & Carville, 1978; Barton, Bonanno & Menz, 2009; Hicks, 1988) especialmente durante el desarrollo (Unger & Rosenbaum, 2004), lo que lo hace un tema delicado a tener en cuenta especialmente en las etapas de crecimiento cuando las estructuras del aparato locomotor aún no están consolidadas.

El calzado infantil debería adaptarse en su diseño a los cambios producidos en el pie durante el desarrollo. Con el crecimiento se observa un aumento en el tamaño del pie, presentando en comparación con el pie adulto una mayor anchura en relación a su longitud. A partir de los 8 años de edad esta relación anchura/longitud se asemeja ya a la del adulto. También se observa un aplanamiento del pie al mismo tiempo que el índice del arco disminuye hasta los 5 años de edad (Müller, Carlsohn, Müller, Baur & Mayer, 2012). Si el estudio de la morfología del pie se realiza en función del sexo, se aprecian diferencias entre varones y mujeres (Hicks, 1988; Krauss, Grau, Mauch, Maiwald & Horstmann, 2008; Manna, Pradhan, Ghosh, Kar & Dhara, 2001). Unger y Rosenbaum (2004) plantean que durante el primer año de deambulación independiente ya se encuentran diferencias, y a igual edad los varones

presentan mayor aplanamiento que las mujeres. Hicks (1988) detecta que las mujeres detienen el desarrollo del pie en edades más tempranas que los varones, y se manifiestan diferencias en el incremento en la anchura del pie. Mickle et al. (2011) confirman el desarrollo más precoz de las mujeres respecto a los varones en niños de primaria y concluyen que la edad y el sexo afectan a la estabilidad postural.

No solo las dimensiones del pie cambian con el desarrollo, la habilidad de marcha también lo hace. Sutherland (1997) sostiene que la maduración de la marcha se obtiene entre los 3 y 4 años, mientras que el resto de los cambios pueden explicarse por el crecimiento. Samson et al. (2013) estudiando el movimiento articular determina que alrededor de los 4 años de edad el movimiento en el tobillo ha madurado, mientras que en cadera y rodilla madura entre los 6 y 7 años o mayor, observándose una mayor variabilidad inter- e intra-sujetos a cualquier edad que en los adultos. Ganley y Powers (2005) sostienen que las diferencias en la cinemática del tobillo en niños de 7 años de edad respecto a adultos se deben a la insuficiente maduración neuromuscular. Más aún, Lythgo et al. (2009) elevan la edad de maduración de la marcha a los 13 años. Si a estas diferencias en la maduración de la marcha se les añade la modificación de la misma asociada a la utilización de calzado (Keenan, Franz, Dicharry, Della Croce & Kerrigan, 2011; Lythgo et al., 2009; Oeffinger, Brauch, Cranfill, Hisle, Wynn & Hicks, 1999; Wolf, Simon, Patikas, Schuster, Armbrust & Döderlein, 2008) el análisis se complica aún más. Oeffinger et al. (1999) y Wolf et al. (2008) encuentran diferencias en la marcha en niños calzados y descalzos, sin que estos cambios estuvieran asociados al sexo, con una velocidad de la marcha estable al aumentar la longitud del paso y disminuir la cadencia. La velocidad de la marcha se utiliza habitualmente para valorar el desarrollo de la marcha en los niños. Müller et al. (2013) valoran la influencia que tiene la edad y la altura en dicha velocidad, comprobando que el coeficiente de variación de la velocidad disminuye a partir de los 8 años de edad, y la influencia de la altura disminuye a partir de una altura de 1.40 m. Para Thevenon et al. (2015) los parámetros temporales se incrementan con la altura, y alcanzan una estabilización a la altura de 1.30 m, produciéndose un punto de inflexión en los parámetros temporales entre los 7 y 8 años de edad.

Por otra parte, se sospecha que la utilización de calzado influye en el desarrollo del pie. Mauch et al. (2008) encuentran un 50% de huellas aplanadas en alumnos de preescolar alemanes frente al 12.5% en alumnos de la misma edad australianos. Estos resultados los relacionan con

la utilización de calzado cerrado por parte de los alemanes, mientras que los niños australianos caminan descalzos con mayor frecuencia o utilizan calzados abiertos. Wolf et al. (2008) observan mayor movimiento en la articulación tibio-astragalina con calzado respecto a descalzo, y lo justifican como una posible compensación de la disminución del movimiento en el plano sagital del mediopié y antepié, ya que el calzado inhibiría los movimientos del antepié afectando al mecanismo de «windlass». Morio et al. (2009) en un estudio en adultos, coinciden en que el calzado no solo limita la movilidad natural del pie descalzo, sino que también impone patrones de movimiento en la fase de impulsión. Proponen la utilización de calzado flexible que permita la expansión del antepié, y evite posibles patologías como deformaciones o fracturas por estrés. Esta recomendación debería ser especialmente tenida en cuenta en menores en edad de crecimiento.

En vista de lo descrito, se aprecia una necesidad de adecuación del diseño del calzado respecto al pie del infante. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar en la marcha y la carrera las diferencias en los movimientos del pie durante el apoyo producidas con el calzado respecto a ir descalzo en niños y niñas de primero de primaria.

Material y método

Participantes

Participaron en el estudio voluntariamente un total de 24 niños (12 niños y 12 niñas) (tabla 1). Para garantizar que tuvieran las habilidades motrices básicas de desplazamiento adquiridas, se aplicó como criterio de inclusión que pertenecieran al primer curso de educación primaria (6-7 años). Como criterios de exclusión, estar sometidos a tratamientos ortésicos en los pies en el momento de la medición; haber sufrido lesiones en el aparato musculoesquelético en los últimos 6 meses y tener un tipo de pie extremo (cavo o plano). Durante la sesión de registro fueron acompañados en todo momento por alguno de sus representantes legales, quienes previamente firmaron un consentimiento informado. El protocolo fue aprobado previamente por el Comité de Ética de la Universidad.

Tabla 1
Estadística descriptiva de la muestra participante en el estudio

	Niños (n=12)	Niñas (n=12)
Edad (años)	6.9 ± 0.5	7.2 ± 0.6
Talla (cm)	121.2 ± 7.2	127.0 ± 7.2
Masa (kg)	25.9 ± 6.8	27.1 ± 7.2
FPI der.	4.4 ± 2.5	5.3 ± 3.7
FPI izq.	4.8 ± 3.4	5.5 ± 3.3
Nº pie	31.6 ± 2.3	32.8 ± 1.9

FPI- *Foot Posture Index* (índice postural del pie). Valores normales para menores en torno a 4 puntos.



Figura 1. Modelo simplificado del pie utilizado para el estudio calzado descalzo.

Instrumentos

Se utilizó el sistema de captura del movimiento Vicon Mx (Oxford Metrics Ltd, Oxford, UK) con 7 cámaras T10 operando a 200 Hz. Para controlar que la velocidad de paso no experimentase grandes cambios entre las distintas repeticiones, se utilizaron dos células fotoeléctricas (Globus, Italia) colocadas en la parte central de la zona de grabación con una separación de 2 m.

El calzado utilizado fue un modelo de zapato infantil del tipo «collegiales» (Conguitos Goflex), diseñado con intención de mejorar la flexión del antepié. Los modelos de niños y de niñas incluían diferencias típicas, como una suela más fina y redondeada por el talón en el caso de las niñas. Se proporcionó a cada participante un par de este calzado sin estrenar, adaptado a su tamaño de pie.

Procedimiento

Para llevar a cabo el registro, se diseñó un circuito ovalado (27.4 m) delimitado por señales en el suelo de un color llamativo. Las cámaras se ubicaron alrededor de la zona media de una recta de 11 m, dejando 5 m de distancia de aceleración, suficiente para alcanzar una velocidad estable al llegar a la zona de grabación. Previamente a la medición, se realizaron las medidas podológicas correspondientes al FPI, para caracterizar el tipo de pie. Se utilizó el FPI frente a otras medidas basadas en la huella plantar o la posición del escafoides, como el índice del arco, la caída del escafoides, etc. (Lara, Lara, Zagalaz & Martínez-López, 2011), por tratarse de una valoración global del pie, rápida y simple, que permite una evaluación multidimensional y que ha demostrado una alta fiabilidad y validez (Redmond, Crosbie & Ouvrier, 2006). Posteriormente se realizó un protocolo de calentamiento general de 10 min de duración, durante el cual los participantes llevaban el calzado con el que se les iba a medir. Estuvo basado en formas jugadas que incluían distintos tipos de carrera, cambios de dirección, cambios de ritmo y saltos, adaptado de un protocolo basado en la teoría de sistemas dinámicos para favorecer la adaptación al calzado (Vernon, Wheat, Naik & Petit, 2004).

Se plantearon como variables independientes el tipo de habilidad (marcha y carrera) y el tipo de calzado (calzado y descalzo), resultando 4 condiciones de medida. Estas condiciones fueron contrabalanceadas y distribuidas aleatoriamente entre los participantes. Cada uno debía dar vueltas al circuito y se les registraba al pasar por la zona de grabación hasta completar cinco repeticiones válidas de cada condición. Se descartaron las repeticiones en las que el participante no mantenía una velocidad estable al pasar por la zona de registro o que su velocidad media no fuera homogénea con el resto de repeticiones. Se controló la velocidad de paso por medio de dos células fotoeléctricas separadas 2 m. Se les permitió elegir su velocidad de desplazamiento en las primeras vueltas de ensayo de cada habilidad, que después debían mantener en todas las repeticiones, con y sin calzado. Cada participante necesitaba entre 5 y 10 repeticiones de cada condición.

Considerando la etapa madurativa de los participantes, los investigadores les dieron instrucciones explicando las tareas a realizar como si de un juego se tratase, para evitar posibles pérdidas de atención o desmotivación.

Se creó un modelo mecánico simplificado del pie compuesto por cinco puntos, basado en el Oxford Foot Model (Carson, Harrington, Thompson, O'Connor & Theologis, 2001) y adaptado para niños (Stebbins, Harrington, Thompson, Zavatsky & Theologis, 2006). Dada la corta edad de los participantes, para abreviar el tiempo de registro con cada uno, se redujo al mínimo el número de marcadores necesarios para medir las variables requeridas. Se situaron marcadores reflectantes en los siguientes puntos anatómicos (figura 1): parte media superior del calcáneo; parte media inferior del calcáneo; parte superior de la cabeza del primer metatarsiano; parte lateral de la cabeza del quinto metatarsiano y mitad de la parte superior de la segunda falange del hallux.

En todos los casos se colocaron los marcadores sobre el pie derecho, bien sobre el calzado o bien sobre el calcetín (en la condición descalzo). Por cuestiones de higiene y ante la posibilidad de que algunos participantes tuvieran reparos en quedarse descalzos, se optó por realizar las mediciones de la condición descalzo con calcetín. Se pidió a los participantes que acudieran a la medición con calcetines de algodón fino y ajustados. Durante las grabaciones se revisaba con frecuencia que la posición de los marcadores no cambiara debido al deslizamiento del calcetín. Un mismo investigador experimentado se encargó de la colocación de todos los marcadores.

Análisis de Datos

A partir del modelo de cinco puntos se calcularon diversas variables relevantes para describir el movimiento del pie. Para medir el ángulo de flexión de las articulaciones metatarsofalángeas se crearon dos segmentos: el antepié, formado por los puntos de las cabezas de los metatarsos y el del hallux; y el otro segmento formado por los puntos de las cabezas de los metatarsos y la parte baja del calcáneo. Este segmento abarca tanto el mediopié como el retropié. Sin embargo, dado que funcionalmente

actúan en conjunto, por simplificar a este segmento lo hemos denominado retropié. Cada segmento forma un plano solidario con la parte anterior o la parte posterior del pie respectivamente, por tanto el ángulo entre ambos planos determina el grado de flexión de las articulaciones metatarsofalángicas. Se midió el ángulo de esta articulación durante el apoyo y se obtuvo su valor máximo.

Se midió también el ángulo de marcha con el pie apoyado, definido por la dirección resultante de la unión entre el punto bajo del calcáneo y el hallux respecto a la dirección de avance, según el sistema de referencias global.

Se calculó la posición del eje de rotación instantáneo de la articulación metatarsofalángica del primer metatarsiano durante el apoyo. En la condición calzado es difícil localizar el punto del eje de flexión, especialmente en acciones dinámicas, ya sea por desajuste en la colocación del marcador o por pliegues producidos con el movimiento. Para evitar errores se aplicó el método del eje de rotación instantáneo (Bergmann & Peterson, 2011). Se calculó la velocidad instantánea de dos puntos pertenecientes al segmento del retropié (el punto bajo del calcáneo y el del primer metatarsiano), y se localizó el lugar donde sus perpendiculares se cruzan proyectadas en el plano sagital. Finalmente se calculó el promedio de la distancia de ese punto respecto al talón desde que el talón despegó del suelo hasta el despegue de la punta del pie (figura 2). Se utilizó el marcador del primer metatarsiano por ser el lugar por donde pasa el centro de presiones en la fase final de impulsión (Stolwijk, Duysens, Louwerens, van de Ven & Keijsers, 2013). Para comprobar la validez de este método, se comparó la medición dinámica en la marcha descalzo con la medida estática desde el talón a la cabeza del primer metatarsiano, resultando un error técnico de la medida de 0.8 cm.

Se calculó la velocidad de caída del pie a partir del cambio en el ángulo entre el vector definido por el punto bajo del calcáneo y el primer metatarsiano. Se determinó la mayor velocidad angular desde el inicio del contacto del talón hasta que los metatarsos entraban en contacto con el suelo (figura 2).

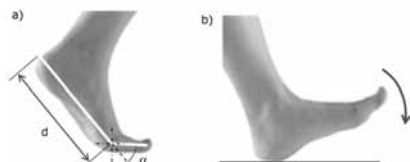


Figura 2. a) Distancia desde el talón hasta el eje de giro de la flexión metatarsofalángica del primer metatarso (d) y ángulo de máxima flexión (a). La posición anatómica corresponde a 0°; b) máxima velocidad de caída del pie tras el apoyo del talón.

Análisis Estadístico

Se calculó la media y desviación típica de cada variable como valores descriptivos. Para comparar las situaciones calzado y descalzo se utilizó la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas. Se analizó por separado al grupo de los niños y de las niñas debido a las diferencias morfológicas específicas tanto en el diseño del calzado como del propio pie (Unger & Rosenbaum, 2004), que pueden afectar a su comportamiento mecánico.

Se calculó la *d* de Cohen como medida de tamaño del efecto, utilizando como denominador la desviación típica agrupada. Valores superiores a 0.8 se consideraron como tamaño del efecto alto, alrededor de 0.5 moderado y por debajo de 0.2 bajo (Thomas, Nelson & Silverman, 2005). Se consideraron diferencias estadísticamente significativas con un nivel $p < .05$.

Para caracterizar la fiabilidad de las medidas, se calculó el $ICC_{2,1}$ como índice de fiabilidad relativa y el error estándar de la medida como índice de fiabilidad absoluta, según la ecuación $SEM = SD(1 - fiabilidad)^{0.5}$, siendo *SD* la desviación típica de las medidas y como valor de fiabilidad se usó el alfa de Cronbach (Brown, 1999).

Resultados

En la tabla 2 se muestran los valores de fiabilidad obtenidos. Se aprecia una buena fiabilidad tanto absoluta como relativa en las variables

Tabla 2

Valores de fiabilidad obtenidos en las variables medidas. Índice de correlación intraclass (ICC) y error estándar de la medida absoluto (SEM)

	Calzado		Descalzo	
	ICC	SEM	ICC	SEM
Marcha				
FlexMax	0.90	0.89°	0.72	2.41°
AMarcha	0.61	2.09°	0.35	2.54°
Dmeta	1.47	0.00 cm	0.98	0.08 cm
VAngMax	0.62	1.30°/s	0.43	1.83°/s
Carrera				
FlexMax	0.83	1.03°	0.78	2.16°
AMarcha	0.29	3.25°	0.48	2.35°
Dmeta	0.83	0.22 cm	0.92	0.18 cm
VAngMax	0.67	2.28°/s	0.43	3.19°/s

FlexMax- ángulo de máxima flexión de la articulación metatarsofalángica.

AMarcha- ángulo de marcha, orientación longitudinal del pie respecto a la dirección de avance.

DMeta- distancia desde el talón al eje articular del primer metatarso.

VAngMax- máxima velocidad angular en la caída del pie tras el apoyo del talón.

El SEM expresado en las unidades propias de cada variable.

Tabla 3

Resultados relativos al movimiento del pie en las habilidades de marcha y carrera

	NIÑOS				NIÑAS			
	Calzado	Descalzo	d	p	Calzado	Descalzo	d	p
Marcha								
FlexMax (°)	18 ± 5	37 ± 6	3.53	0.002	19 ± 7	40 ± 10	2.47	0.002
AMarcha (°)	6 ± 5	8 ± 3	0.48	0.019	3 ± 5	5 ± 3	0.42	0.182
DMeta (cm)	16.38 ± 1.01	15.20 ± 1.39	0.97	0.004	17.12 ± 1.07	16.20 ± 0.83	0.97	0.002
VAngMax (°/s)	16.69 ± 2.47	16.62 ± 3.51	0.03	0.272	15.98 ± 3.84	18.58 ± 2.17	0.83	0.023
Carrera								
FlexMax (°)	17 ± 7	37 ± 6	3.20	0.002	17 ± 7	38 ± 10	2.44	0.002
AMarcha (°)	8 ± 4	11 ± 4	0.62	0.099	7 ± 5	7 ± 3	0.23	0.814
DMeta (cm)	16.80 ± 1.21	15.05 ± 1.62	1.22	0.002	17.04 ± 0.82	16.13 ± 0.83	1.10	0.002
VAngMax (°/s)	22.43 ± 5.92	14.87 ± 4.61	1.42	0.002	23.61 ± 7.74	17.13 ± 5.49	0.97	0.034

FlexMax- ángulo de máxima flexión de la articulación metatarsofalángica.

DMeta- distancia desde el talón al eje articular del primer metatarso.

AMarcha- ángulo de marcha, orientación longitudinal del pie respecto a la dirección de avance.

VAngMax- máxima velocidad angular en la caída del pie tras el apoyo del talón.

d- tamaño del efecto. p- nivel de significación estadística.

que dependen menos de la acción voluntaria del participante (FlexMax y DMeta). La fiabilidad relativa es menor en las variables más dependientes del participante, lo que podríamos llamar su técnica, especialmente en la carrera. Esto es normal debido a la gran variabilidad intra-sujeto propia de los niños en habilidades como la marcha (Stolze, Kuitz-Buschbeck, Mondwurf, Johnk & Friege, 1998).

En la tabla 3 se muestran los resultados de las variables analizadas tanto en la marcha como en la carrera. Se aprecian diferencias importantes entre las condiciones calzado y descalzo tanto en marcha como en carrera en ambos géneros. Destaca el ángulo de flexión máxima de los metatarsos, que presenta diferencias significativas y un tamaño del efecto alto en todas las condiciones. También el punto del eje de la articulación metatarsofalángica, aunque con unas diferencias en torno a 1 cm. Respecto a la velocidad de caída del pie, en la marcha se aprecia una disparidad entre niños y niñas. Mientras que en las niñas se reduce con el calzado, en los niños no, interpretamos que por las diferencias en el diseño de la mediasuela en la parte del talón.

Por otra parte, el ángulo de marcha no presenta diferencias excepto en la marcha en los niños, aunque el tamaño del efecto es moderado.

Discusión

El objetivo del presente trabajo fue comparar biomecánicamente cómo afecta el uso del calzado en la marcha y la carrera en niños y niñas. Los resultados muestran que se producen diferencias en algunas de las variables analizadas, con ciertas divergencias en los niños respecto a las niñas, especialmente en la marcha.

El resultado más notable y consistente es que el calzado reduce considerablemente la flexión en la articulación metatarsofalángica, en torno a 20°, por igual en marcha y en carrera en ambos géneros. Wolf et al. (2008) encuentran un valor medio de flexión del hallux de 37.1° descalzo frente a 25.7° y 27.8° según dos modelos de calzado, en este caso también se observa una reducción en los grados de flexión en la articulación metatarsofalángica aunque menores que en nuestro estudio. Wegener et al. (2011) en una revisión sistemática y meta-análisis que realizan sobre los efectos del calzado en la marcha infantil también encuentran una reducción en los grados de flexión dorsal del hallux durante el despegue digital. Wegener et al. (2009) describen una reduc-

ción en los grados de flexión del hallux de 34.91° descalzo a 23.39° calzado. Esta reducción podría interpretarse como una limitación no deseada a la movilidad natural del pie. Sin embargo, también puede ser considerado un mecanismo de protección y de mejora de la eficiencia en la impulsión. El calzado limita el movimiento de flexión y esto propicia dos beneficios: por una parte permite un mejor reparto de las presiones sobre el pie que en la situación descalzo, en la que la parte final de la impulsión recae principalmente sobre las cabezas de los metatarsos (Bergstra et al., 2015; Yan, Sinclair, Hiller, Wegener & Smith, 2015). Por otra parte supone una mayor rigidez en la planta del pie, que se ha asociado con una mejor transmisión de la energía generada hacia las partes superiores del cuerpo, por lo tanto una mayor eficiencia (Roy & Stefanyshyn, 2006), e incluso se ha constatado una mejora en el rendimiento en distintas habilidades deportivas (Stefanyshyn & Fusco, 2004; Tinoco, Bourgit & Morin, 2010).

Un aspecto directamente relacionado con el ajuste del calzado al pie es la ubicación del eje de la articulación metatarsofalángica. Nuestros resultados muestran un desajuste del eje con calzado respecto a ir descalzo de en torno a 1 cm hacia la parte anterior del pie. En los niños la diferencia media llega a ser de 1.75 cm en carrera, mientras que en las niñas se queda por debajo del centímetro. Posiblemente las diferencias estructurales de diseño marcan las diferencias. A pesar de que la diferencia en la posición del eje parece pequeña, el tamaño del efecto es alto, por lo que se trata de una diferencia relevante en la práctica. Es por ello por lo que sería recomendable ajustar el diseño de los calzados retrasando su eje de flexión aproximadamente 1 cm.

En cuanto a la velocidad de caída del pie, en la marcha en niñas se aprecian diferencias significativas con un tamaño del efecto alto, en las que el calzado reduce la velocidad con la que el pie cae hasta apoyarse completamente en el suelo. Esto puede ser interpretado como positivo ya que produciría un menor estrés en la musculatura flexora del tobillo al realizar el frenado en contracción excéntrica.

En los niños en cambio, no se aprecian diferencias, es decir, en la marcha la velocidad de caída del pie se mantiene, ya sea calzado o descalzo. Esperábamos que esto sucediera en los chicos puesto que la mediasuela en la parte posterior es considerablemente más rectangular y sobresale más que en el de las niñas, lo que provoca que el brazo de palanca respecto al eje de flexo-extensión del tobillo en el apoyo sea mayor. Esto nos lleva a especular si redondear la suela en la parte posterior del calzado en los niños, tal como sucede en las niñas, conseguiría reducir la velocidad de caída del pie respecto a caminar descalzo. En cualquier caso, sería necesario plantear estudios que utilizaran técnicas electromiográficas para conocer el efecto real sobre la musculatura flexora del tobillo.

Respecto a la carrera, el comportamiento es distinto al de la marcha. Se aprecian diferencias estadísticamente significativas tanto en niños como en niñas, con un tamaño del efecto alto, pero en este caso el calzado tiende a aumentar la velocidad de caída. En la carrera, a diferencia de la marcha, se da una fase aérea que provoca que el contacto del pie con el suelo se produzca con un mayor impacto. Esto provoca que se utilice inconscientemente un mecanismo de amortiguación natural por el que al correr descalzos tendemos a evitar realizar el apoyo inicial con el talón, y en cambio hacerlo con el pie plano o incluso con el antepié (Hamill, Russell, Gruber & Miller, 2011; Hatala, Dingwall, Wunderlich & Richmond, 2013). A pesar de que a los participantes en el estudio se les pidió que corrieran apoyando el talón, cuando iban descalzos en la mayoría de niños el pie tendía a apoyar más plano de lo que lo hacía en la condición calzado, lo que implica que el pie tiene un recorrido de caída menor y por lo tanto una velocidad menor. Esto explica que tanto niños como niñas presenten mayores velocidades con el calzado. La diferencia no puede ser atribuida directamente a las características del calzado, sino a que la presencia del calzado hace que se modifique la técnica de apoyo, iniciando el contacto más claramente con el talón y provocando un mayor recorrido del pie y consecuentemente un incremento de su velocidad de caída.

En cuanto al ángulo de marcha, solamente se ha encontrado una diferencia estadísticamente significativa en los niños durante la marcha,

sin embargo el tamaño del efecto es moderado. Además en ninguna de las otras situaciones se encuentran diferencias, por lo que podríamos concluir que el calzado no interfiere en el ángulo de marcha. En cualquier caso, esta es la variable que ha mostrado ser menos fiable entre repeticiones, seguramente por la alta variabilidad en los infantes, por lo que los resultados deben ser tomados con cautela.

Como conclusión, podemos determinar que el calzado modifica algunas variables del apoyo del pie durante la carrera y la marcha, especialmente el ángulo de máxima de flexión de la articulación metatarsofalángica y la máxima velocidad angular en la caída del pie tras el apoyo del talón, lo cual incide especialmente en aspectos como la movilidad del pie, su protección o la técnica de apoyo, cuando los niños llevan calzado frente a cuando van descalzos. También se observa un ligero desajuste en la posición del eje de flexión metatarsofalángica con calzado respecto a ir descalzo, lo cual puede indicar la necesidad de modificar la posición del eje de flexión del calzado.

Entre las limitaciones del estudio indicamos las siguientes: el número de participantes es muy ajustado; el modelo simplificado del pie limita el número de variables que se pueden obtener para describir su comportamiento dinámico; el uso de marcadores externos en los estudios fotogramétricos, a pesar de estar controlado, siempre está sujeto a posibles inexactitudes en su colocación, así como a posibles desplazamientos o vibraciones durante los registros.

Agradecimientos

La realización de este estudio fue posible gracias a la ayuda económica aportada por la empresa Illice Internacional S.A., a través del contrato por asesoramiento y asistencia técnica ILLICE1.13A.

Los autores declaran que no hay ningún conflicto de interés.

Referencias

- Arlen, D., & Carville, E. T. (1978). The proper fit. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 68(4), 263-265.
- Barton, C. J., Bonanno, D., & Menz, H. B. (2009). Development and evaluation of a tool for the assessment of footwear characteristics. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2, 10.
- Bergmann, T., & Peterson, D. (2011). *Chiropractic technique* (3 ed.). St. Louis, Missouri: Elsevier.
- Bergstra, S.A.; Kluitenberg, B.; Dekker, R.; Bredeweg, S.W.; Postema, K.; Van den Heuvel, E.R.; Hijmans, J.M.; Sobhani, S. (2015) Running with a minimalist shoe increases plantar pressure in the forefoot region of healthy female runners. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18, 463-468.
- Brown, J. D. (1999). Standard error vs. standard error of measurement. *JALT Testing & Evaluation SIG*, 3(1), 20-25.
- Carson, M. C., Harrington, M. E., Thompson, N., O'Connor, J. J., & Theologis, T. N. (2001). Kinematic analysis of a multi-segment foot model for research and clinical applications: a repeatability analysis. *Journal of Biomechanics*, 34(10), 1299-1307.
- Ganley, K. J., & Powers, C. M. (2005). Gait kinematics and kinetics of 7 year old children: a comparison to adults using age-specific anthropometric data. *Gait & Posture*, 21, 141-145.
- Hagen, M., & Hennig, E. M. (2009). Effects of different shoe-lacing patterns on the biomechanics of running shoes. *Journal of Sports Sciences*, 27(3), 267-275.
- Hamill, J., Russell, E. M., Gruber, A. H., & Miller, R. (2011). Impact characteristics in shod and barefoot running. *Footwear Science*, 3(1), 33-40.
- Hatala, K. G., Dingwall, H. L., Wunderlich, R. E., & Richmond, B. G. (2013). Variation in Foot Strike Patterns during Running among Habitually Barefoot Populations. *PLoS One*, 8(1), e52548.
- Hicks, J. F. (1988). Fitting a population of feet. *Journal of Testing and Evaluation*, 16(4), 404-406.
- Keenan, G. S., Franz, J. R., Dicharry, J., Della Croce, U., & Kerrigan, D. C. (2011). Lower limb joint kinetics in walking: The role of industry

- recommended footwear. *Gait & Posture*, 33, 350-355.
- Krauss, I., Grau, S., Mauch, M., Maiwald, C., & Horstmann, T. (2008). Sex-related differences in foot shape. *Ergonomics*, 51(11), 1693-1709.
- Lara, S., Lara, A.J., Zagalaz, M.L., & Martínez-López, E.J. (2011). Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar. *Retos*, 19, 49-53.
- Lythgo, N., Wilson, C., & Galea, M. (2009). Basic gait and symmetry measures for primary school-aged children and young adults whilst walking barefoot and with shoes. *Gait & Posture*, 30(4), 502-506.
- Llana, S., Brizuela, G., Dura, J. V., & Garcia, A. C. (2002). A study of the discomfort associated with tennis shoes. *Journal of Sports Sciences*, 20(9), 671-679.
- Manna, I., Pradhan, D., Ghosh, S., Kar, S. K., & Dhara, P. (2001). A comparative study of foot dimension between adult male and female and evaluation of foot hazards due to using of footwear. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 20(4), 241-246.
- Mauch, M., Mickle, K. J., Munro, B. J., Dowling, A. M., Grau, S., & Steele, J. R. (2008). Do the feet of German and Australian children differ in structure? Implications for children's shoe design. *Ergonomics*, 51(4), 527-539.
- Mickle, K. J., Bridges, B. M., & Steele, J. R. (2011). Gender and age affect balance performance in primary school-aged children. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14, 243-248.
- Morio, C., Lake, M. J., Gueguen, N., Rao, G., & Baly, L. (2009). The influence of footwear on foot motion during walking and running. *Journal of Biomechanics*, 42(13), 2081-2088.
- Müller, S., Carlsohn, A., Müller, J., Baur, H., & Mayer, F. (2012). Static and dynamic foot characteristics in children aged 1-13 years: A cross-sectional study. *Gait & Posture*, 35, 389-394.
- Müller, J., Müller, S., Baur, H., & Mayer, F. (2013). Intra-individual gait speed variability in healthy children aged 1-15 years. *Gait and Posture*, 38, 631-636.
- Nurse, M.A., Hulliger, M., Wakeling, J. M., Nigg, B. M., & Stefanyshyn, D. J. (2005). Changing the texture of footwear can alter gait patterns. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 15(5), 496-506.
- O'Leary, K., Vorpahl, K. A., & Heiderscheit, B. (2008). Effect of cushioned insoles on impact forces during running. *Journal of American Podiatric Medical Association*, 98(1), 36-41.
- Oeffinger, D., Brauch, B., Cranfill, S., Hisle, C., Wynn, C., & Hicks, R. (1999). Comparison of gait with and without shoes in children. *Gait & Posture*, 9(2), 95-100.
- Redmond, A. C., Crosbie, J., & Ouvrier, R. A. (2006). Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index. *Clinical Biomechanics*, 21(1), 89-98.
- Roy, J. P., & Stefanyshyn, D. J. (2006). Shoe midsole longitudinal bending stiffness and running economy, joint energy, and EMG. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(3), 562-569.
- Samson, W., Van Hamme, A., Desroches, G., Dohin, B., Dumas, R., & Chèze, L. (2013). Biomechanical maturation of joint dynamics during early childhood: Update conclusions. *Journal of Biomechanics*, 46, 2258-2263.
- Silva, R. M., Rodrigues, J. L., Pinto, V. V., Ferreira, M. J., Russo, R., & Pereira, C. M. (2009). Evaluation of shock absorption properties of rubber materials regarding footwear applications. *Polymer Testing*, 28, 642-647.
- Spears, I. R., Miller-Young, J. E., Sharma, J., Ker, R. F., & Smith, F. W. (2007). The potential influence of the heel counter on internal stress during static standing: a combined finite element and positional MRI investigation. *Journal of Biomechanics*, 40(12), 2774-2780.
- Stebbins, J., Harrington, M., Thompson, N., Zavatsky, A., & Theologis, T. (2006). Repeatability of a model for measuring multi-segment foot kinematics in children. *Gait & Posture*, 23(4), 401-410.
- Stefanyshyn, D., & Fusco, C. (2004). Increased shoe bending stiffness increases sprint performance. *Sports Biomechanics*, 3(1), 55-66.
- Stolwijk, N. M., Duysens, J., Louwerens, J. W., van de Ven, Y. H., & Keijsers, N. L. (2013). Flat feet, happy feet? Comparison of the dynamic plantar pressure distribution and static medial foot geometry between Malawian and Dutch adults. *PLoS One*, 8(2), e57209.
- Stolze, H., Kuhtz-Buschbeck, J. P., Mondwurf, C., Johnk, K., & Friege, L. (1998). Retest reliability of spatiotemporal gait parameters in children and adults. *Gait & Posture*, 7(2), 125-130.
- Sutherland, D. (1997). The development of mature gait. *Gait and Posture*, 6, 163-170.
- Thevenon, A., Gabrielli, F., Lepvrier, J., Faupin, A., Allart, E., Tiffeau, V., & Wiczorek, V. (2015). Collection of normative data for spatial and temporal gait parameters in a sample of French children aged between 6 and 12. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 58, 139-144.
- Thomas, J. R., Nelson, J. K., & Silverman, S. J. (2005). *Research Methods in Physical Activity* (5 ed.). Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Tinoco, N., Bourgit, D., & Morin, J. B. (2010). Influence of midsole metatarsophalangeal stiffness on jumping and cutting movement abilities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 224(3), 209-217.
- Unger, H., & Rosenbaum, D. (2004). Gender-specific differences of the foot during the first year of walking. *Foot & Ankle International*, 25(8), 582-587.
- van der Zwaard, B. C., Vanwanseele, B., Holtkamp, F., van der Horst, H. E., Elders, P. J., & Menz, H. B. (2014). Variation in the location of the shoe sole flexion point influences plantar loading patterns during gait. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1), 20.
- Vernon, T., Wheat, J., Naik, R., & Petit, G. (2004). *Changes in gait characteristics of a normal, healthy population due to an unstable shoe construction*. Extraído el 18 de octubre de 2010 de <http://www.walkaroundstockholm.se/pdf/sheffield.pdf>.
- Wegener, C., Hunt, A. E., Vanwanseele, B., Burns, J., & Smith, R. M. (2011). Effect of children's shoes on gait: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*, 4, 3.
- Wegener, C., O'Meara, D. M., Smith, R. M., Hunt, A. E., & Vanwanseele, B. (2009). *The effect of school shoes on foot and leg motion during functional activities in children*. Sydney: The University of Sydney, Faculty of Health Sciences.
- Wolf, S., Simon, J., Patikas, D., Schuster, W., Armbrust, P., & Döderlein, L. (2008). Foot motion in children shoes-A comparison of barefoot walking with shod walking in conventional and flexible shoes. *Gait & Posture*, 27, 51-59.
- Yan, A. F., Sinclair, P. J., Hiller, C., Wegener, C., & Smith, R. M. (2013). Impact attenuation during weight bearing activities in barefoot vs. shod conditions: a systematic review. *Gait & posture*, 38(2), 175-186.

