

Latorre-Román, P.A.; Soto Hermoso, V.M.; García-Pinillos, F.; Gil-Cosano, J.J.; Robles Fuentes, A.; Muñoz Jiménez, M.; Molina-Molina, A (202x) Fatigue's Effects on Spatiotemporal Parameters and Footstrike Patterns During a Half Marathon. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. X (X) pp. xx. <http://cdeporte.rediris.es/revista/> ___*

ORIGINAL

¿AFECTA LA FATIGA A LA CINEMÁTICA DE LA CARRERA DE RESISTENCIA?

DOES FATIGUE AFFECT THE KINEMATICS OF ENDURANCE RUNNING?

Latorre-Román, P.A.¹; Soto Hermoso, V.M.²; García-Pinillos, F.^{2,3}; Gil-Cosano, J.J.⁴; Robles Fuentes, A.²; Muñoz Jiménez, M.¹ y Molina-Molina, A.^{2,5}

¹ Universidad de Jaén, Departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal, Jaén (España) platorre@ujaen.es, mmjimene@ujaen.es

² Instituto Mixto Universitario Deporte y Salud (IMUDS), Departamento de Educación Física y Deportiva, Facultad de Ciencias del Deporte, Universidad de Granada, Granada (España) vsoto@ugr.es, fegarpi@gmail.com, saltodemanos@yahoo.es, amolinam@ugr.es

³ Departamento de Educación Física, Deportes y Recreación. Universidad de La Frontera, Temuco (Chile) fegarpi@gmail.com

⁴ PROFITH "PROmoting FITness and Health through Physical Activity" Research Group, Instituto Mixto Universitario Deporte y Salud (IMUDS), Departamento de Educación Física y Deportiva, Facultad de Ciencias del Deporte, Universidad de Granada, Granada (España) josejuangil@ugr.es

⁵ Universidad San Jorge, Facultad de Ciencias de la Salud, Villanueva de Gállego, Zaragoza (España) amolinam@usj.es

Código UNESCO / UNESCO code: 240602, Biomecánica / Biomechanics

Clasificación Consejo de Europa / Council of Europe classification: 3. Biomecánica del deporte / Sport's Biomechanics

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar el patrón de pisada, inversión y variables espaciotemporales para una amplia muestra de corredores amateurs, durante una carrera de larga distancia, según sexo y posición de clasificación. Se analizaron 368 hombres y 67 mujeres, que participaron en la XVII Media Maratón Internacional de Córdoba (España). Se registró el km 5 y km 15, utilizando técnicas de fotogrametría 2D de alta velocidad para medir la pisada, la inversión, el tiempo de contacto (TC) y el tiempo de vuelo (TV). El grupo que empeoró su clasificación en el km 15 aumentó la prevalencia de FSP y la asimetría del INV. Un análisis de Pearson indica que la variación de la clasificación en la carrera está relacionada con TC ($r=0,429$, $p<0,001$) y TV ($r=-0,360$, $p<0,001$). La prevalencia de retropié y los parámetros espaciotemporales

mostraron diferentes patrones dependiendo de si los corredores mejoraron o empeoraron su clasificación.

PALABRAS CLAVE: carrera; larga distancia; resistencia; biomecánica; rendimiento.

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the footstrike pattern (FSP), inversion (INV) and spatial-temporal variables in a large sample of recreational runners during a long-distance competition, according to sex and changes in the classification race. A total of 368 men and 67 women, who participated in the XVII International Half Marathon of Cordoba (Spain) were analysed. It was recorded at km 5 and km 15, where high-speed camcorder and 2D-photogrammetric techniques were used to measure FSP, INV, contact time (CT) and flight time (FT). The group that worsened their classification at km 15 increase RFS prevalence and INV asymmetry. A Pearson analysis indicates that variation of the classification in the race between the marks km 5 and km 15 is related with CT ($r=0.429$, $p<0.001$) and FT ($r=-0.360$, $p<0.001$). RFS prevalence and spatial-temporal parameters showed different patterns depending on whether the runners improved or worsened their ranking.

KEYWORDS: running; long distance; endurance; biomechanics; performance.

INTRODUCCIÓN

Correr como una actividad para mejorar la salud y el rendimiento personal se ha extendido cada vez más entre la población amateur. Hoy en día, el número de participantes en las carreras populares de resistencia ha aumentado, junto con el número de carreras organizadas. Por ejemplo, en la media maratón de Valencia 2020, España, 19.076 corredores (19,51% mujeres) terminaron la carrera. El fenómeno popular de la carrera se debe, entre otros factores, a la satisfacción de las necesidades de salud física y psicológica, el logro de objetivos, las recompensas tangibles, las influencias sociales y la fácil disponibilidad (Carmack & Martens, 2016; Urbaneja & Farias, 2018). Es necesario avanzar en la descripción de las características fisiológicas, psicológicas y sobre todo biomecánicas de estos corredores en términos de prevención de lesiones y mejora del rendimiento. En este contexto, se han estudiado ampliamente los parámetros espaciotemporales de la marcha como: el tiempo de contacto (TC), el tiempo de vuelo (TV), la frecuencia de paso y los parámetros cinemáticos como: el patrón de pisada y las variables cinéticas como: la carga de impacto, la fuerza de reacción del suelo, etc., aunque con resultados controvertidos (Kim et al., 2018).

A pesar de los avances científicos y tecnológicos en torno a la carrera, el control del entrenamiento, la técnica o el calzado, los corredores sufren lesiones a un ritmo elevado, entre el 27% y el 70% de los corredores amateurs o profesionales de larga distancia se lesionan durante el transcurso de la temporada (Daoud et

al., 2012; Fields et al., 2010; Van Gent et al., 2007). La etiología de estas lesiones es multifactorial. Se han implicado varios factores intrínsecos y extrínsecos como factores de riesgo de lesión de las extremidades inferiores, por ejemplo: 1) la edad, el sexo, la aptitud física, los desajustes anatómicos; y 2) el índice de masa corporal, la lesión anterior, la rehabilitación inadecuada, el nivel de competencia, el número de sesiones semanales de entrenamiento, el tipo de calzado, la superficie de carrera, respectivamente (Benca et al., 2020; Murphy et al., 2003; Salas Sánchez et al., 2013; Tauton et al., 2002; Van Gent et al., 2007).

Sin embargo, existe un debate polémico sobre cuáles son los factores de riesgo de lesión más importantes para los corredores. Las cuestiones relacionadas con los factores de riesgo y el patrón de pisada óptimo son objeto de un prominente debate, como por ejemplo, la dinámica del pie en contacto con el suelo, y las zapatillas ideales para correr (Davis & Hollander, 2020). Recientemente, Kulmala et al. (2018) demostró que el calzado altamente amortiguador aumenta la rigidez de las extremidades inferiores, la carga de impacto y cambian la mecánica de resorte de la carrera en los atletas que corren con apoyo de retropié. A su vez, correr con un calzado convencional y maximalista puede aumentar las demandas en las estructuras musculoesqueléticas reduciendo la transición de impactos, que pueden ser perjudiciales para los tejidos pasivos. Por lo tanto, correr con calzado maximalista influye en el riesgo de lesiones en los corredores recreacionales en general (Malisoux et al., 2020). Además, las zapatillas modernas han alterado nuestro patrón de pisada de un predominante apoyo de antepié, aterrizando con las cabezas metatarsianas, a un predominante apoyo de retropié, aterrizando con la mitad o el tercio trasero de la suela (Davis et al., 2017). En consecuencia, la fuerza repentina de la carga se distribuye a través del sistema músculo-esquelético del corredor, lo que hace que la pisada sea un importante predictor de lesiones (Cheung & Davis, 2011; Daoud et al., 2012; Pohl et al., 2008, 2009). A este respecto, aunque correr con antepié parece ser una característica de la evolución humana [4], los corredores recreacionales adultos de resistencia muestran una alta prevalencia - entre el 74,9% y el 95,4% - de apoyo de retropié (Hasegawa et al., 2007; Kasmer et al., 2013; Larson et al., 2011; Latorre-Román et al., 2015). El apoyo de retropié se asocia con una mayor carga vertical, rigidez en los tobillos y en las rodillas (Cheung & Davis, 2011) y su asociación con el riesgo de lesiones (Daoud et al., 2012; Lieberman et al., 2010). Lieberman et al. (2010) encontraron una mayor fuerza de colisión con un apoyo de retropié que con un apoyo de mediopié o antepié (Lieberman et al., 2010). Según varios estudios, el apoyo de retropié y el apoyo de antepié suelen tener diferentes patrones de fuerza de reacción contra el suelo; los aterrizajes del retropié generan un pico rápido y de alta magnitud, justo después del impacto del pie contra el suelo; el antepié también genera un impacto, aunque no hay un pico de impacto claro y acentuado (Lieberman et al., 2010; Williams et al., 2000; Wit et al., 2000).

El uso de los diferentes patrones de pisada también depende de la velocidad de carrera, la superficie de carrera, la fatiga (Daoud et al., 2012) y el nivel de los corredores Latorre-Román et al. (2015). En particular, un apoyo de antepié puede llegar a ser difícil de mantener en eventos de larga distancia (Jewell et al., 2017). En consecuencia, Ogueta-Alday et al. (2018) observaron que existe una relación entre el nivel atlético en la media maratón y el patrón de pisada, para los

corredores de larga distancia; en este sentido, los corredores de alto nivel mostraron el porcentaje más alto de apoyos de mediopié y antepié (~ 73%) y un TC más bajo en comparación con los otros tres grupos de menor nivel. El aumento en TC muestra una fuerte relación con el aumento de la longitud del paso durante una carrera hasta el agotamiento a velocidad de VO₂max. En consecuencia, la capacidad de mantener un TC corto parece ser absolutamente necesaria para mantener el rendimiento durante una carrera hasta la extenuación (Hayes & Caplan, 2014). Además, un TC más corto con inversión en el contacto inicial del pie permite el uso de la energía elástica y la rigidez del músculo de la pierna para aumentar la economía de la carrera (Hasegawa et al., 2007). Sin embargo, Latorre-Román et al. (2017) indicaron que no había cambios significativos en las características cinemáticas [TC y TV] y patrón de pisada en corredores de resistencia después de la fatiga inducida por un largo entrenamiento intermitente de alta intensidad (HIIT, por sus siglas en inglés) que consistía en 5x2000 m con 120 s de recuperación entre carreras y altos niveles de fatiga. Asimismo, García-Pinillos et al. (2016) informan de que ni el rendimiento atlético ni el nivel de fatiga alcanzado parecen ser determinantes en las variables cinemáticas como el TC, el TV, la longitud de paso y el patrón de pisada durante un HIIT consistente en repeticiones de 4x3x400 m con un período de recuperación pasiva de 1 minuto entre carreras y 3 minutos entre series.

Por lo tanto, a pesar de los numerosos estudios que tratan de definir las ventajas y desventajas de ciertos tipos de pisada y de calzado (Kasmer et al., 2013), se han realizado pocos estudios sobre los patrones de pisada en grandes muestras de corredores recreacionales durante una competición de larga distancia (Hasegawa et al., 2007; Kasmer et al., 2013; Latorre-Román et al., 2015). La desventaja de estos estudios es que no se realizó un análisis intra-participante durante la carrera. Por consiguiente, se sabe poco sobre la evolución del patrón de la pisada y las variables cinemáticas durante una carrera de larga distancia a través de medidas en varias marcas de la carrera en corredores recreacionales. Recientemente, Bovatino et al. (2020) y Larson et al. (2011) demostraron que un gran porcentaje de corredores modificaron su pisada de antepié/mediopié a retropié, desde el inicio hasta el final de la competición. Sin embargo, estos estudios no analizaron el efecto de los cambios en la clasificación de los corredores durante la carrera sobre las variables cinemáticas, es decir, las diferencias intra-participante.

Teniendo en cuenta la información anterior, este estudio se centró en los cambios inducidos por la fatiga en los parámetros cinemáticos de los corredores recreacionales de larga distancia. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue determinar el patrón de pisada, la inversión y las variables espaciotemporales en una muestra grande de corredores, en su mayoría amateurs, durante una competición de larga distancia sobre asfalto, según el sexo y los cambios en la clasificación intra-corredor entre dos marcas kilométricas (km 5 y km 15).

MATERIAL Y MÉTODO

PARTICIPANTES

Se analizaron cuatrocientos treinta y cinco atletas (368 hombres y 67 mujeres) que participaron en la XVII Media Maratón Internacional de Córdoba. Los corredores fueron registrados en dos marcas kilométricas diferentes a lo largo de la carrera: el km 5 y el km 15. Estas localizaciones se eligieron teniendo en cuenta el espacio entre los atletas (es decir, evitando la multitud en la salida) y la falta y presencia de fatiga en las marcas del km 5 y el km 15, respectivamente. El estudio fue aprobado por el comité de ética de la Universidad de Jaén.

MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

Videos del plano sagital (240 Hz) fueron grabados con una cámara de alta velocidad (Casio Exilim EXF1, Shibuyaku, Tokio 151-8543, Japón) en el km 5 y el km 15. Los vídeos se tomaron desde una vista lateral, con la cámara colocada perpendicularmente a 5 metros del participante para poder ser filmados en el plano sagital. El lugar de filmación se estableció a lo largo de un pasillo de 5 metros. Los datos de video fueron analizados usando un editor de video 2D (VideoSpeed vs1,38, Granada, España). La determinación del patrón de pisada basada en vídeo 2D ha sido utilizada en otros estudios (Hollander et al., 2018) y, a pesar de no ser tan exacta como la valoración cuantitativa, es práctica para la evaluación de un gran cohorte (Hollander et al., 2016) y es válida y altamente fiable independientemente de la experiencia del evaluador (de Oliveira et al., 2019). Las variables dependientes seleccionadas para el análisis cinemático están en línea con los estudios anteriores (Hasegawa et al., 2007; Larson et al., 2011; Latorre Román et al., 2017) y son las siguientes: el patrón de pisada en el contacto con el suelo: apoyo de retropié, donde el contacto inicial se hace en algún lugar del talón o del tercio posterior del pie; apoyo de mediopié, donde el talón y la suela hacen contacto casi simultáneamente; y apoyo de antepié, donde el contacto inicial se hace con las cabezas de los metatarsos. En la figura 1 se muestran imágenes que ilustran diferentes tipos de pisadas. De acuerdo con el procedimiento utilizado en un estudio previo (Hollander et al., 2018), la pisada se calificó como retropié o no retropié, ya que esta variable dicotómica muestra una precisión muy alta en la determinación de para la pisada (concordancia entre las calificaciones: 0,981) y una precisión menor en la decisión entre antepié y mediopié (0,893) (Hollander et al., 2018). A su vez, la inversión en la fase de apoyo se observó en relación con la rotación en el eje anteroposterior y se registró cuando la zapatilla contacta con el suelo en su parte lateral. Además, mediante técnicas fotogramétricas 2D, se analizó el tiempo de contacto (TC) (tiempo durante el cual el pie está en contacto con el suelo) y el tiempo de vuelo (TV) (tiempo durante el cual no hay contacto con el suelo). Además, también se analizaron las asimetrías entre el pie derecho y el izquierdo. Los lugares de filmación, tanto en las marcas de los km 5 como en las de los km 15, se caracterizaron por tener superficies de suelo relativamente planas, de modo que la pisada no se vería influida por la inclinación o el declive de la superficie del suelo. Para cada corredor se filmaron aproximadamente cuatro impactos de pie claros (dos de derecha y dos de izquierda).



Figura 1. Patrón de pisada e inversión del pie. De izquierda a derecha: retropié, mediopié, antepié e inversión.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las estadísticas descriptivas se representan como media, desviación estándar, frecuencia y porcentaje. Para analizar las diferencias entre las variables cuantitativas y las nominales, se utilizaron el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de McNemar, respectivamente. Para las variables espaciotemporales se utilizó el promedio de ambos pies (pasos izquierdo y derecho). Además, en una muestra de 80 corredores, se calculó la fiabilidad intra-observador e inter-observador utilizando el Kappa de Cohen y la proporción de acuerdo para la pisada e inversión. Estas observaciones fueron realizadas por tres observadores experimentados entre los cambios de clasificación en la carrera entre las marcas de km 5 y km 15 y TC y TV. El nivel de significación fue $p < 0,05$. El análisis de los datos se realizó utilizando SPSS (versión 21) SPSS Inc., Chicago, Ill, USA).

RESULTADOS

La fiabilidad intra-observador obtenida para la pisada fue de un valor de Kappa = 0,904 y para la inversión Kappa = 0,732. La confiabilidad inter-observador obtenida para la pisada fue de un valor de Kappa = 0.801 ± 0.09 , y para la inversión Kappa = 0.727 ± 0.11 . En la tabla 1 se muestra la proporción de acuerdo para la pisada y la inversión.

La clasificación durante la carrera desde el km 5 al km 15 empeoró tanto en los hombres ($187,51 \pm 109,11$ vs. $210,71 \pm 119,56$ rango, $p < 0,001$) como en las mujeres ($385,44 \pm 63,88$ vs. $450,89 \pm 71,59$ rango, $p < 0,001$). La tabla 2 muestra la pisada, la inversión y la asimetría para todo el grupo y en relación con el sexo para el km 5 y el km 15. Para la muestra total y de hombres se observa un aumento significativo de la prevalencia del retropié desde el km 5 hasta el km 15. Sin embargo, las mujeres no mostraron cambios significativos. Asimismo, la asimetría de la inversión mostró el mismo comportamiento. Teniendo en cuenta los corredores que mejoran (rango $\Delta 22,37$) y empeoran (rango $\Delta 46,27$) su clasificación desde el km 5 hasta el km 15, la tabla 3 muestra que el grupo cuya clasificación empeora a la altura del km 15 aumenta la prevalencia de retropié y la asimetría de la inversión. Además, se encontraron diferencias significativas en el TC y el TV tanto en hombres como en mujeres (figura 2). Las mujeres aumentaron el TC ($p < 0,001$) y redujeron el TV ($p < 0,01$) al km 15. Sin embargo, los hombres aumentaron el TV ($p < 0,001$) en el km 15. Además, los corredores que mejoraron su clasificación en el km 15 redujeron el TC ($p < 0,01$) y aumentaron el TV ($p < 0,001$) (Figura 3). Los corredores cuya clasificación

empeoró, aumentaron el TC ($p < 0,05$). Un análisis de correlación de Pearson indicó que la variación de la clasificación en la carrera entre el km 5 y el km 15 estaba relacionada con el TC ($r = 0,429$, $p < 0,001$) y el TV ($r = -0,360$, $p < 0,001$).

Tabla 1. Proporción de acuerdo para la pisada y la inversión (intra-observador)

	Retropié	Mediopié	Antepié	Inversión
Retropié	88,66%			
Mediopié		83,3%		
Antepié			100%	
Inversión				85%

PENDIENTE DE PUBLICACIÓN / IN PRESS

Tabla 2. Patrón de pisada, inversión y asimetría en relación a la muestra total y al sexo para el km 5 y el km 15.

	Total				Hombres				Mujeres			
	Km 5		Km 15		Km 5		Km 15		Km 5		Km 15	
	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER
Retropié	400 (92,0)	401 (92,2)	416 (96,1)***	412 (95,2)*	336 (91,3)	337 (91,6)	351 (9,9)***	349 (95,1)*	64 (95,5)	64 (95,5)	64 (95,5)	65 (97,0)
Asimetría retropié	17 (3,9)		17 (3,9)		15 (4,1)		13 (3,6)		2 (3,0)		4 (6,0)	
Inversión	210 (48,3)	210 (48,3)	215 (50,2)	214 (49,7)	193 (52,4)	190 (51,6)	210 (48,3)	210 (48,3)	215 (50,2)	214 (49,7)	193 (52,4)	190 (51,6)
Asimetría inversión	30 (6,9)		50 (11,8)**		27 (7,3)		45 (12,6)**		3 (4,5)		5 (7,6)	

IZQ: pie izquierdo; DER: pie derecho; *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001. Los datos son mostrados como n (%).

PENDIENTE DE PUBLICACIÓN / IN PRESS

Tabla 3. Patrón de pisada, inversión y asimetría en relación a la clasificación del km 5 y del km 15.

	Corredores que mejoraron su posición durante la carrera				Corredores que empeoraron su posición durante la carrera			
	Km 5		Km 15		Km 5		Km 15	
	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER
Retropié	94 (89,5)	93 (88,6)	98 (95,1)	97 (93,3)	306 (92,7)	308 (93,3)	318 (96,4)**	318 (96,4)*
Asimetría retropié	7 (6,7)		3 (2,9)		10 (3,0)		10 (3,0)	
Inversión	59 (56,2)	57 (54,3)	62 (60,2)	58 (56,3)	151 (45,8)	153 (46,4)	153 (47,1)	156 (47,6)
Asimetría inversión	10 (9,5)		13 (12,9)		20 (6,1)		37 (11,5)**	

IZQ: pie izquierdo; DER: pie derecho; *p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001. Los datos son mostrados como n (%).

PENDIENTE DE PUBLICACIÓN / IN PRESS

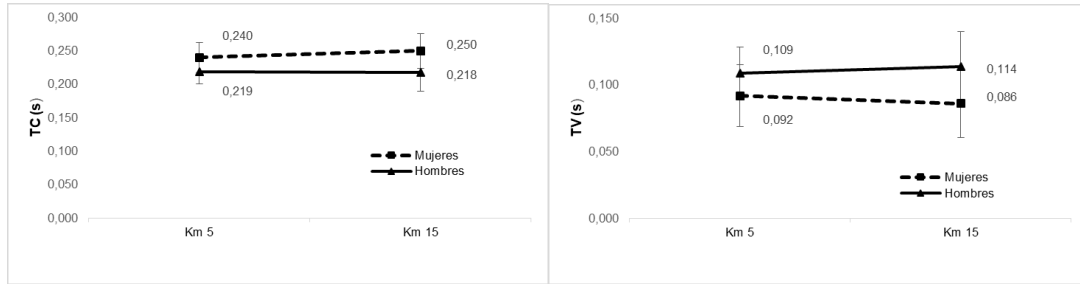


Figura 2. Tiempo de contacto y tiempo de vuelo en hombres y mujeres con relación a la clasificación del km 5 y del km 15.

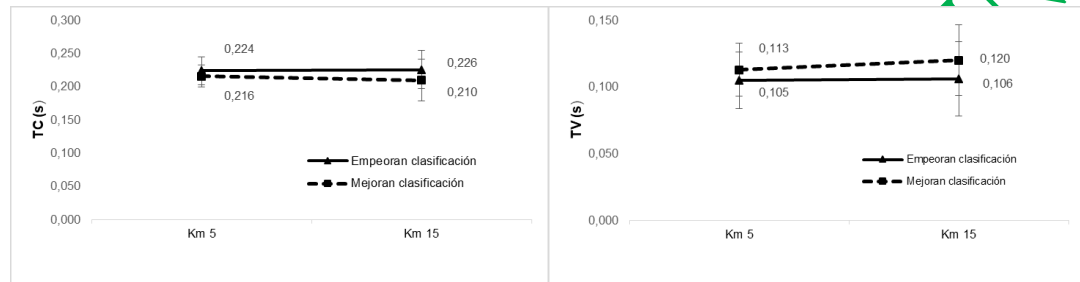


Figura 3. Tiempo de contacto y tiempo de vuelo en corredores que empeoraron o mejoraron su clasificación desde el km 5 al km 15.

DISCUSIÓN

La página web oficial de la XVII Media-Maratón Internacional de Córdoba informó que 3.124 atletas terminaron la competición; el tiempo más rápido para los hombres fue de 1 h 05'08" y para las mujeres fue de 1 h 22'31", con un tiempo medio de 1 h 43'50". Esta población de estudio es representativa del promedio actual de los corredores amateurs de larga distancia. El propósito de este estudio fue determinar las variables de pisada, de inversión y espaciotemporales en una amplia muestra de corredores, en su mayoría amateurs, durante una competición de larga distancia en asfalto, según el sexo y los cambios en la clasificación durante la carrera entre dos marcas kilométricas (km 5-km 15).

La principal conclusión de este estudio fue que hubo un aumento de la prevalencia de retropié desde la marca del km 5 al km 15 sólo en el grupo de hombres. Además, los corredores cuya clasificación empeoró en el km 15, mostraron una mayor prevalencia de retropié y asimetría de la inversión. En cuanto a los parámetros espaciotemporales, las mujeres aumentaron y redujeron el TC y el TV, respectivamente, a la altura del km 15. Además, los corredores que mejoraron su clasificación en el km 15 redujeron el TC y aumentaron el TV y se encontró una relación positiva y negativa entre la variación de la clasificación en la carrera desde el km 5 hasta el km 15 y el TC y el TV, respectivamente.

Aunque muy pocos estudios han investigado este tema, de acuerdo con el estudio actual, Hanley et al. (2019) mostraron que en los maratonianos de élite la pisada más habitual era el retropié, con proporciones nunca inferiores al 54% de los hombres o al 67% de las mujeres; además, la proporción de retropié

aumentó durante la carrera en los hombres, aunque más del 75% de los atletas mantuvieron su pisada. Al respecto, un estudio reciente señaló que de los corredores que no presenta un apoyo de retropié al comienzo de la carrera, cambian en gran medida a retropié conforme aumenta la distancia (Bovalino et al., 2020). El apoyo de antepié presenta una mayor actividad muscular en gastrocnemio medial y lateral en comparación con retropié (Valencia et al., 2020), con el transcurso de una competición, la fatiga acumulada podría reducir en número de apoyos de antepié. Asimismo, Hasegawa et al. (2007) observaron un aumento de la frecuencia de retropié en relación con las peores posiciones en la competición. A su vez, Larson et al. (2011) encontraron un aumento en la frecuencia de retropié entre el km 10 y el km 32 de un maratón internacional, presumiblemente debido a la fatiga; sin embargo, la asimetría de los pies era menos común en el km 32. Un reciente estudio, no observó asimetrías espaciotemporales entre pierna dominante y no dominante para corredores recreacionales (Ortega et al., 2021). Estos hallazgos, de acuerdo con lo observado, cambiaron de antepié a mediopié en una competición debido a la fatiga muscular resultante por un aumento de la carga excéntrica de los músculos plantar-flexor del tobillo en el momento del aterrizaje en los corredores de antepié, lo que puede contribuir a una disminución del torque al final de la carrera (Jewell et al., 2017). En un ultramaratón (161-km), Kasmer et al. (2014) observaron un aumento de la prevalencia de retropié a mitad de carrera debido a las mayores demandas musculares reflejadas en las altas concentraciones de creatina-cinasa en sangre después de la carrera para aquellos corredores que no presentaron un apoyo de retropié. Asimismo, Salas Sánchez et al. (2013) en un contexto de laboratorio, indicaron que la frecuencia del retropié aumenta con la fatiga. Por lo tanto, el cambio de la pisada en corredores de larga distancia puede deberse a la compensación de la fatiga neuromuscular porque se observó una reducción de la contracción voluntaria máxima durante la flexión plantar del tobillo después de la carrera; aunque eso no indica una mayor eficiencia en la carrera (Kim et al., 2018). En este contexto, los corredores de retropié y mediopié exhiben una mayor carga de impacto que los de antepié en el transcurso de un maratón. Además, esta carga de impacto aumenta con la velocidad tanto para el retropié como para el mediopié, pero no para el antepié, aunque tanto la velocidad como la carga de impacto se redujeron entre las marcas de la carrera de km 10 y km 40 del maratón (Ruder et al., 2017). Recientemente, Bovalino et al. (2020) informaron de un aumento significativo de la prevalencia de retropié desde el km 3 hasta la de km 13 (76,9% frente a 91%, respectivamente) y de que el tiempo de finalización de la carrera difería según el patrón de pisada en el que los corredores más rápidos eran más coherentes con un apoyo de mediopié o antepié que los más lentos ($62,64 \pm 11,20$ min frente a $72,58 \pm 10,84$ min; $p < 0,001$). Estos hallazgos van en relación con un estudio de Hasegawa et al. (2007) y Latorre-Román et al. (2015), quienes señalan que el porcentaje apoyos de retropié aumenta con la disminución de la velocidad de carrera; en consecuencia, apoyo de retropié fue más común entre la población de corredores más lentos.

En relación con el sexo, a diferencia de los hombres, las mujeres no modificaron su pisada ni inversión, resultados similares a los de Larson et al. (2011) entre el km 10 y km 32 del maratón, donde encuentran un mayor aumento de la prevalencia de retropié en los hombres que en las mujeres. En los maratonianos de élite de los Campeonatos Mundiales de la IAAF de 2017, Hanley et al. (2019)

demonstraron que no había diferencias entre los sexos en cuanto a la proporción de patrones de pisada. Aunque descubrieron que la proporción de retropié aumentaba con la distancia recorrida en los corredores varones, las mujeres no mostraron diferencias entre el km 19 y km 40 en la pisada. Sin embargo, Kasmer et al. (2014) no encontraron diferencias significativas entre hombres y mujeres en la pisada y durante un ultra maratón de 161 km, considerando varios lugares de filmación. Recientemente, Boccia et al. (2018) indicaron que una carrera de medio maratón incitaba a la fatiga tanto central como periférica, sin diferencias significativas entre hombres y mujeres. Por lo tanto, se trata de un tema controvertido o de una laguna de conocimiento en el campo de estudio.

Con respecto a las variables espaciales y temporales, se produjeron cambios significativos, tanto en el TC como en el TV, desde el km 5 hasta el km 15, teniendo en cuenta tanto el sexo como la posición en la carrera, los hombres y los corredores que mejoran la clasificación en el km 15, reduciendo el TC y aumentando el TV. Estos resultados difieren de los de Chan-Roper et al. (2012), que demuestran un aumento del TC entre el km 8 y el km 40 de una maratón.

A este respecto, el TV más largo y la longitud de paso parecen ser las principales características de funcionamiento de los corredores de alto nivel en comparación con sus homólogos de bajo nivel (Felipe García-Pinillos et al., 2019). Por lo tanto, el TC más corto parece ser muy consistente entre los corredores de resistencia de alto nivel (Ogueta-Alday et al., 2018). Sin embargo, el TC y el TV presentaron resultados contradictorios en cuanto a su asociación con la economía de carrera en los corredores de larga distancia (Pizzuto et al., 2019). Los corredores con apoyo de retropié son más económicos que los que exhiben apoyos de mediopié a velocidades de carrera submáximas (57%-81% de $\dot{V}O_{2max}$) y esta diferencia podría explicarse debido a que el TC es más largo y el TV más corto en corredores de retropié (Ogueta-Alday et al., 2014). Consecuentemente con esto, un TC más largo implicaba un $\dot{V}O_{2max}$ más bajo en mediopié y retropié; y en un TC dado, los corredores con retropié eran menos económicos que con mediopié (Di Michele & Merni, 2014). Finalmente, un TC más corto y una mayor frecuencia de inversión en el contacto con el pie podría contribuir a una mayor economía de carrera (Hasegawa et al., 2007).

Hay que mencionar algunas limitaciones en este estudio. La principal limitación de este estudio fue no proporcionar variables sociodemográficas y antropométricas, que podrían haber ayudado en el debate. Una segunda limitación es el uso de un sistema de análisis de vídeo para medir el patrón de pisada, siendo menos preciso que un sistema de captura de movimiento en 3D. En tercer lugar, el calzado no fue controlado ni evaluado. A pesar de estas limitaciones, el presente estudio incluye una gran muestra de corredores recreacionales, por lo que estos resultados proporcionan un alto poder estadístico. Desde un punto de vista práctico, los resultados del estudio actual pueden utilizarse para caracterizar la carrera típica de los corredores amateurs de larga distancia durante un medio maratón, lo que proporciona información útil para que los atletas y los entrenadores comprendan mejor la forma en que el impacto de la pisada podría influir en el rendimiento del atleta o en el riesgo de lesiones. Las importantes diferencias entre el patrón de pisada y los parámetros espaciotemporales según el sexo y los cambios de posición en la carrera,

sugeridos por este estudio, constituyen una contribución original al análisis biomecánico de la carrera de resistencia a partir de un paradigma ecológico (fuera del laboratorio). Sin embargo, el estudio actual no puede determinar con precisión si los corredores más experimentados y bien entrenados, la fatiga o el control del ritmo son responsables de los cambios en la pisada y de los parámetros espaciotemporales durante la carrera.

CONCLUSIONES

Hubo una alta prevalencia de retropié entre la mayoría de los corredores populares de larga distancia, que aumentó del km 5 al km 15 sólo en los grupos de hombres y en los corredores, cuya clasificación empeoró durante la carrera al km 15. A su vez, los parámetros espaciotemporales durante una media maratón se vieron afectados por el sexo, ya que las mujeres aumentaron y redujeron el TC y el TV, respectivamente, del km 5 al km 15. Además, los corredores que mejoraron su posición en la carrera en el km 15 redujeron el TC y aumentaron el TV. Estos hallazgos sugieren que no presentar un apoyo de retropié, no aumentar el tiempo de contacto y no disminuir el tiempo de vuelo podría ser beneficioso para mejorar el rendimiento durante una carrera de larga distancia en los últimos kilómetros. Más investigación podría aclarar las causas y consecuencias de los hallazgos actuales sobre el rendimiento en la carrera y las lesiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benca, E., Listabarth, S., Flock, F. K. J., Pablik, E., Fischer, C., Walzer, S. M., Dorotka, R., Windhager, R., & Zia, P. (2020). Analysis of Running-Related Injuries: The Vienna Study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), 438. <https://doi.org/10.3390/jcm9020438>
- Boccia, G., Dardanello, D., Tarperi, C., Festa, L., La Torre, A., Pellegrini, B., Schena, F., & Rainoldi, A. (2018). Women show similar central and peripheral fatigue to men after half-marathon*. *European Journal of Sport Science*. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1442500>
- Bovalino, S. P., Cunningham, N. J., Zordan, R. D., Harkin, S. M., Thies, H. H. G., Graham, C. J., & Kingsley, M. I. C. (2020). Change in foot strike patterns and performance in recreational runners during a road race: A cross-sectional study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.12.018>
- Carmack, M. A., & Martens, R. (2016). Measuring Commitment to Running: A Survey of Runners' Attitudes and Mental States. *Journal of Sport Psychology*. <https://doi.org/10.1123/jsp.1.1.25>
- Chan-Roper, M., Hunter, I., W Myrer, J., L Eggett, D., & K Seeley, M. (2012). Kinematic changes during a marathon for fast and slow runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(1), 77–82.
- Cheung, R. T. H., & Davis, I. S. (2011). Landing Pattern Modification to Improve Patellofemoral Pain in Runners: A Case Series. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 41(12), 914–919. <https://doi.org/10.2519/jospt.2011.3771>
- Daoud, A. I., Geissler, G. J., Wang, F., Saretsky, J., Daoud, Y. a., & Lieberman,

- D. E. (2012). Foot strike and injury rates in endurance runners: A retrospective study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(7), 1325–1334. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182465115>
- Davis, I. S., & Hollander, K. (2020). The Interaction of Foot Strike and Footwear in Runners. *Clinical Care of the Runner*, 1(1), 87–94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-67949-7.00009-4>
- Davis, I. S., Rice, H. M., & Wearing, S. C. (2017). Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries. In *Journal of Sport and Health Science* (Vol. 6, Issue 2, pp. 154–161). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2017.03.013>
- de Oliveira, F. C. L., Fredette, A., Echeverría, S. O., Batcho, C. S., & Roy, J. S. (2019). Validity and Reliability of 2-Dimensional Video-Based Assessment to Analyze Foot Strike Pattern and Step Rate During Running: A Systematic Review. In *Sports Health*. <https://doi.org/10.1177/1941738119844795>
- Di Michele, R., & Merni, F. (2014). The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *Journal of Science and Medicine in Sport*. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.05.012>
- Fields, K. B., Sykes, J. C., Walker, K. M., & Jackson, J. C. (2010). Prevention of running injuries. *Current Sports Medicine Reports*, 9(3), 176–182. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3181de7ec5>
- García-Pinillos, F., Soto-Hermoso, V. M., & Latorre-Román, P. Á. (2016). Do Running Kinematic Characteristics Change over a Typical HIIT for Endurance Runners? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(10). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001380>
- García-Pinillos, Felipe, García-Ramos, A., Ramirez-Campillo, R., Latorre-Román, P. Á., & Roche-Seruendo, L. E. (2019). How do spatiotemporal parameters and lower-body stiffness change with increased running velocity? A comparison between novice and elite level runners. *Journal of Human Kinetics, in press*(December), 25–38. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0036>
- Hanley, B., Bissas, A., Merlino, S., & Gruber, A. H. (2019). Most marathon runners at the 2017 IAAF World Championships were rearfoot strikers, and most did not change footstrike pattern. *Journal of Biomechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.05.024>
- Hasegawa, H., Yamauchi, T., & Kraemer, W. J. (2007). Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 888–893. <https://doi.org/10.1519/R-22096.1>
- Hayes, P. R., & Caplan, N. (2014). Leg stiffness decreases during a run to exhaustion at the speed at VO₂max. *European Journal of Sport Science*. <https://doi.org/10.1080/17461391.2013.876102>
- Hollander, K., De Villiers, J. E., Venter, R., Sehner, S., Wegscheider, K., Braumann, K. M., & Zech, A. (2018). Foot Strike Patterns Differ between Children and Adolescents Growing up Barefoot vs Shod. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/s-0043-120344>
- Hollander, K., van der Zwaard, B. C., de Villiers, J. E., Braumann, K.-M., Venter, R., & Zech, A. (2016). The effects of being habitually barefoot on foot mechanics and motor performance in children and adolescents aged 6–18 years: study protocol for a multicenter cross-sectional study (Barefoot LIFE

- project). *Journal of Foot and Ankle Research*, 9(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13047-016-0166-1>
- Jewell, C., Boyer, K. A., & Hamill, J. (2017). Do footfall patterns in forefoot runners change over an exhaustive run? *Journal of Sports Sciences*. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1156726>
- Kasmer, M. E., Liu, X. C., Roberts, K. G., & Valadao, J. M. (2013). Foot-strike pattern and performance in a marathon. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(3), 286–292. <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.3.286>
- Kasmer, M. E., Wren, J. J., & Hoffman, M. D. (2014). Foot strike pattern and gait changes during a 161-km ultramarathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(5), 1343–1350. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000282>
- Kim, H. K., Mirjalili, S. A., & Fernandez, J. (2018). Gait kinetics, kinematics, spatiotemporal and foot plantar pressure alteration in response to long-distance running: Systematic review. *Human Movement Science*. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.09.012>
- Kulmala, J. P., Kosonen, J., Nurminen, J., & Avela, J. (2018). Running in highly cushioned shoes increases leg stiffness and amplifies impact loading. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35980-6>
- Larson, P., Higgins, E., Kaminski, J., Decker, T., Preble, J., Lyons, D., McIntyre, K., & Normile, A. (2011). Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *Journal of Sports Sciences*, 29(15), 1665–1673. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610347>
- Latorre-Román, P. A., Muñoz Jiménez, M., Soto Hermoso, V. M., Salas Sánchez, J., Molina Molina, A., Robles Fuentes, A., & García-Pinillos, F. (2015). Acute effect of a long-distance road competition on foot strike patterns, inversion and kinematics parameters in endurance runners. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 15(2), 588–597. <https://doi.org/10.1080/24748668.2015.11868816>
- Latorre-Román, P., García Pinillos, F., Bujalance-Moreno, P., & Soto-Hermoso, V. M. (2017). Acute effects of high-intensity intermittent training on kinematics and foot strike patterns in endurance runners. *Journal of Sports Sciences*, 35(13), 1247–1254. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1218038>
- Latorre Román, P. A., Balboa, F. R., & Pinillos, F. G. (2017). Foot strike pattern in children during shod-unshod running. *Gait & Posture*, 58, 220–222. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.07.121>
- Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., Daoud, A. I., D'Andrea, S., Davis, I. S., Mang'Eni, R. O., & Pitsiladis, Y. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531–535. <https://doi.org/10.1038/nature08723>
- Malisoux, L., Delattre, N., Urhausen, A., & Theisen, D. (2020). Shoe Cushioning Influences the Running Injury Risk According to Body Mass: A Randomized Controlled Trial Involving 848 Recreational Runners. *American Journal of Sports Medicine*, 48(2), 473–480. <https://doi.org/10.1177/0363546519892578>
- Murphy, D. F., Connolly, D. a J., & Beynon, B. D. (2003). Risk factors for lower extremity injury: a review of the literature. *British Journal of Sports Medicine*,

- 37(1), 13–29. <https://doi.org/10.1136/bjism.37.1.13>
- Ogueta-Alday, A., Morante, J. C., Gómez-Molina, J., & García-López, J. (2018). Similarities and differences among half-marathon runners according to their performance level. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191688>
- Ogueta-Alday, A., Rodríguez-Marroyo, J. A., & García-López, J. (2014). Rearfoot striking runners are more economical than midfoot strikers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(3), 580–585. <https://doi.org/10.1249/MSS.000000000000139>
- Ortega, D. R., Berral Aguilar, A. J., & de la Rosa, F. J. B. (2021). Bilateral asymmetries and sex differences in the kinematics of running gait cycle of a group of Andalusian recreational runners. *Retos*, 2041(41), 512–518. <https://doi.org/10.47197/retos.v0i41.85934>
- Pizzuto, F., de Oliveira, C. F., Soares, T. S. A., Rago, V., Silva, G., & Oliveira, J. (2019). Relationship Between Running Economy and Kinematic Parameters in Long-Distance Runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003040>
- Pohl, M. B., Hamill, J., & Davis, I. S. (2009). Biomechanical and anatomic factors associated with a history of plantar fasciitis in female runners. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 19(5), 372–376. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3181b8c270>
- Pohl, M. B., Mullineaux, D. R., Milner, C. E., Hamill, J., & Davis, I. S. (2008). Biomechanical predictors of retrospective tibial stress fractures in runners. *Journal of Biomechanics*, 41(6), 1160–1165. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.02.001>
- Ruder, M., Jamison, S. T., Tenforde, A., Hannan, M., & Davis, I. (2017). Relationship of Footstrike Pattern and Landing Impacts During a Marathon Race. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000517200.37366.12>
- Salas Sánchez, J., Latorre Román, P., Soto Hermos, V., Santos e Campos, M., García Pinillos, F., Latorre Román, P., Soto Hermoso, V., Santos Campos, M., & García Pinillos, F. (2013). Características sociodemográficas del corredor popular veterano español . *Kronos: Revista Universitaria de La Actividad Física y El Deporte*.
- Tauton, J. E., Ryan, M. B., Clement, D. B., McKenzie, D. C., Lloyd-Smith, D. R., & Zumbo, B. D. (2002). A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 36, 95–101. <https://doi.org/10.1136/bjism.36.2.95>
- Urbaneja, J. S., & Farias, E. I. (2018). Trail running in Spain. Origin, evolution and current situation; natural areas. *Retos*, 2041(33), 123–128.
- Valencia, O., Cristi, I., Ahumada, D., Meza, K., Salas, R., Weinstein, A., & Guzmán-Venegas, R. (2020). The initial impact with forefoot increases the muscular activity of gastrocnemius during running. A quantitative study of electromyographic activity. *Retos*, 83, 271–275.
- Van Gent, R. N., Siem, D., Van Middelkoop, M., Van Os, A. G., Bierma-Zeinstra, S. M. A., & Koes, B. W. (2007). Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 41(8), 469–480. <https://doi.org/10.1136/bjism.2006.033548>

- Williams, D. S., McClay, I. S., & Manal, K. T. (2000). Lower extremity mechanics in runners with a converted forefoot strike pattern. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(2), 210–218. <https://doi.org/10.1123/jab.16.2.210>
- Wit, B. De, Clercq, D. De, & Aerts, P. (2000). Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shod running. *Journal of Biomechanics*, 33.

Número de citas totales / Total references: 45 (100%)

Número de citas propias de la revista / Journal's own references: 3 (7%)

PENDIENTE DE PUBLICACIÓN / IN PRESS