

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

Facultad de Ciencias de la Salud

Grado en Fisioterapia

Trabajo Fin de Grado

Curso 2023-2024

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA MARATÓN DE VALENCIA
2023.**



**Universidad
Europea**

Autores

Matthieu HELIAS

Thomas ROSER

Tutora

María FIGUEROA MAYORDOMO

Valencia, 2024

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA MARATÓN DE VALENCIA
2023.**

TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO POR:

Matthieu HELIAS

Thomas ROSER

TUTORA DEL TRABAJO:

María FIGUEROA MAYORDOMO

FACULTAD DE FISIOTERAPIA

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

VALENCIA

CURSO 2023-2024

Quiero agradecer sinceramente a mis tutores, María FIGUEROA MAYORDOMO y Javier GAMEZ PAYA, por su apoyo y sus consejos a lo largo de este estudio. Su experiencia y disponibilidad me han ayudado mucho a avanzar en mis investigaciones y a superar las dificultades encontradas. Gracias por su paciencia y aliento. Este trabajo no habría sido posible sin ustedes.

También agradezco a mis padres por su amor, su apoyo constante y sus ánimos. Su presencia y sus sacrificios me han permitido llevar a cabo este proyecto.

Gracias por todo.

ÍNDICE

1	Introducción	5
1.1	Características de la carrera.....	5
1.2	La maratón	5
1.2.1	Definición.....	5
1.2.2	Historia y récords absolutos.....	6
1.2.3	Factores de rendimiento en una maratón	6
1.3	La maratón de Valencia 2023	6
1.4	Definición de una elite	6
1.5	Anatomía.....	7
1.5.1	Los músculos de la carrera.....	7
1.6	Biomecánica de la carrera	7
1.7	Las mujeres y la maratón	8
2	Hipótesis y Objetivos	8
3	Material y Método	9
3.1	Participantes	9
3.2	Protocolo	9
3.3	Procesamiento de datos.....	11
3.3.1	Variables categóricas.....	12
3.3.2	Variables temporales	12
3.3.3	Variable espacial	13
4	Resultados.....	14
4.1	Resultados de las 50 primeras atletas.....	14
4.1.1	Variables categóricas.....	14
4.1.2	Variables temporales	14
4.1.3	Variables espaciales :.....	15
4.2	Resultados comparativos entre el grupo 1 y grupo 2.....	16
4.2.1	Variables categóricas.....	16
4.2.2	Variables temporales	17
4.2.3	Variables espaciales :.....	18
5	Discusión.....	18
6	Limitaciones.....	19
7	Conclusión.....	20
8	Bibliografía.....	21

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ABREVIACION	DEFINICION
WA	World Athletics
RFEA	Real Federación Española de Atletismo
RE	Economía de Carrera
FSA	Foot Strike Angle
RFS	Rear Foot Strike
MFS	Middle Foot Strike
FFS	Front Foot Strike
ms	milisegundos
ppm	pasos por minuto
m	metro
p	probabilidad

RESUMEN

Introducción: La Maratón de Valencia, reconocida con la distinción platino por World Athletics (WA) y considerado el mejor maratón de España según la Real Federación Española de Atletismo (RFEA), atrae a atletas de nivel internacional. Para alcanzar un rendimiento óptimo en esta competencia, es crucial mejorar la Economía de Carrera (RE) de los participantes. La RE se ve afectada por diversas variables, incluyendo categorías como el apoyo, la inclinación de la tibia ; variables temporales como las fases concéntricas, excéntrica y de vuelo, además de la cadencia; y la variable espacial referente a la longitud del paso. **Objetivo:** el objetivo de este estudio es entender como las variables biomecánicas de carrera influyen al rendimiento del atleta de larga distancia. **Materiales y Métodos:** se realizó un estudio de la biomecánico en el plano sagital de la carrera de 49 atletas mediante una grabación y análisis de un video bidimensional. Se divide la muestra en dos grupos (grupo 1 : n=24 y grupo 2 : n=25), con el fin de valorar las semejanzas y desemejanzas del patrón de carrera en función del nivel deportivo. **Resultados y Discusión:** las variables más relevantes y predominantes en cuanto al patrón de carrera de los atletas analizados son un apoyo medio pie (MFS) (52%), una tibia verticalizada (65.3%), una cadencia de 187 pasos por minutos (ppm), y una longitud de paso de 1.54 metros (m). Se observa entre ambos grupos un a diferencias significativas sobre la longitud de paso ($p < 0,001$). **Conclusión:** Los corredores de élite analizado en la maratón de valencia tienen un patrón de carrera con un apoyo MFS, una tibia vertical y una cadencia superior a los 180 ppm.

Palabras clave: Running Economy, biomecánica, patrones de pisadas, carrera, maratón.

ABSTRACT

Introduction: The Valencia Marathon, recognized with platinum distinction by World Athletics (WA) and considered the best marathon in Spain according to the Royal Spanish Athletics Federation (RFEA), attracts internationally renowned athletes. To achieve optimal performance in this competition, improving Running Economy (RE) of participants is crucial. RE is affected by various variables, including categories such as support, tibial inclination; temporal variables such as concentric, eccentric, and flight phases, in addition to cadence; and the spatial variable referring to step length. **Objective:** The objective of this study is to understand how biomechanical variables of running influence the performance of long-distance athletes. **Materials and Methods:** A study of biomechanics in the sagittal plane of running was conducted on 49 athletes through recording and analysis of two-dimensional video. The sample is divided into two groups (Group 1: n=24 and Group 2: n=25), in order to assess similarities and differences in running patterns based on athletic level. **Results and Discussion:** The most relevant and predominant variables in the running pattern of the analysed athletes are midfoot strike (MFS) (52%), a verticalized tibia (65.3%), a cadence of 187 steps per minute (spm), and a step length of 1.54 meters (m). Significant differences are observed between both groups regarding step length ($p < 0.001$). **Conclusion:** The elite runners analysed in the Valencia Marathon exhibit a running pattern with MFS support, a vertical tibia, and a cadence exceeding 180 spm.

Keys words: Running Economy, biomechanics, foot strike patterns, running, marathon.

1 Introducción

1.1 Características de la carrera

La práctica del running está actualmente en auge y sobre todo desde el contexto sanitario de los últimos años que ha permitido que esta actividad física se expanda entre la población. Su accesibilidad, bajo coste y beneficios para la salud la hacen muy atractiva (Kakouris N. et al 2021).

Un estudio elaborado por la Federación Francesa de Atletismo presenta la carrera a pie como la tercera actividad física más practicada en Francia después del senderismo y del ciclismo.

En 2022, alrededor de 12 millones de franceses practicarán este deporte, frente a los aproximadamente 8,5 millones registrados en la primera encuesta de 2014. Aunque los hombres siguen siendo la mayoría en esta práctica, la disparidad de género tiende a reducirse con un aumento del número de mujeres que practican esta actividad. De hecho, el 54% de los nuevos practicantes en los últimos dos años son mujeres.

Dentro de las motivaciones que incitan a la población a empezar la carrera encontramos : “salud, bienestar y mantenimiento del cuerpo” (76%); “formación y preparación para una actuación” (25%); “aceptar un desafío” (15%); “competencia” (12%); “el vínculo social” (11%) (Le Running, valeur sûre pendant la crise | Fédération Française d'Athlétisme).

Además de ser una actividad física, es un deporte que está registrado por la World Athletics (WA) la cual organiza carreras oficiales alrededor del mundo. Con las diferentes distancias de carrera que existen se puede clasificar este deporte de varias formas entre las cortas distancias o sprints de 100m / 200m / 400m, las medias distancias de 800m / 1500m / 5000m / 10000m y las largas distancias de 21.0975 kilómetros (medio maratón) / 42.195 kilómetros (maratón).

1.2 La maratón

1.2.1 Definición

Como se ha dicho previamente, la maratón es una carrera de distancia larga que se practica sobre el asfalto en un circuito de 42.195 kilómetros. Se puede considerar como una prueba de resistencia tanto física como mental durante la cual el atleta tendrá que tener en cuenta varios elementos para acabar la carrera y ser lo más óptimo posible.

1.2.2 Historia y récords absolutos

Este concurso data de la época griega y ha sido organizado por primera vez de manera oficial en los Juegos Olímpicos de Atenas en 1896 el cual fue terminado en un tiempo de 2h 58min 50s por el corredor Griego Spyridon Louis. Es solamente en 1984 que la categoría femenina fue oficialmente incluida en esta distancia olímpica.

El récord mundial masculino actual ha sido establecido el 8 de Octubre 2023 en Chicago por el corredor Keniano de 24 años Kelvin Kiptum en 2h 00min 35s. El récord mundial femenino es de 2h 11min 53s y está detenido por la Etiopía Tigist Assefa.

1.2.3 Factores de rendimiento en una maratón

Como en todos los deportes, hay que tener en cuenta una serie de variables intrínsecas para actuar de la manera más eficaz posible. Dentro de los factores cruciales para triunfar en una maratón encontramos al entrenamiento, la biomecánica, la nutrición, el reposo, el aspecto mental, las tecnologías como relojes/zapatillas/ropas...

1.3 La maratón de Valencia 2023

El 3 de diciembre tuvo lugar la maratón de Valencia 2023. Más de 32000 personas estaban inscritas para este evento de reconocimiento mundial y unos 26000 llegaron a la meta con más de 5000 personas en menos de tres horas. El récord del recorrido ha sido establecido por el ganador Sisay Lemma en 2h 01min 48s. El corredor experimentado Kenenisa Bekele, acabó la carrera en un tiempo de 2h 04min 19s lo cual le permite también acceder a los Juegos Olímpicos de París 2024 (mínimo requerido de 2h 08 min 10s para los hombres). En cuanto a las mujeres, ganó la etíope Worknesh Degefa, con el séptimo mejor tiempo de la historia en maratón femenino (2h 15min 51s).

1.4 Definición de una elite

Los corredores que compiten a nivel élite son categorizados como aquellos que participan en competiciones tanto a nivel nacional como internacional. Son una minoría dentro del conjunto total de participantes en pruebas de atletismo, sin embargo, constituyen un grupo suficientemente significativo para investigar debido a su papel crucial en el establecimiento de récords y en el logro de las mejores actuaciones. Su volumen de entrenamiento es muy elevado, con cargas semanales que alcanzan hasta 160 km/semana, lo que aumenta el riesgo de padecer lesiones relacionadas con la carrera a pie (Teixeira R. 2016). Son personas que presentan unas características físicas de alto rendimiento que les van a permitir realizar unas performances inaccesibles para personas comunes.

1.5 Anatomía

1.5.1 Los músculos de la carrera

Como se explica en este extracto del libro « running et marathon : l'intégrale » publicado en 2014, los componentes del sistema musculoesquelético trabajan en armonía para permitir que el cuerpo humano funcione.

Generalmente se considera que hay cinco grupos principales de músculos que se utilizan durante la carrera: los cuádriceps, los isquiotibiales, los glúteos, los flexores de la cadera y los músculos de la pantorrilla.

Para tener un movimiento efectivo y regular, nuestros músculos profundos deben estar fuertes. Estos músculos profundos juegan un papel esencial, permitiendo un anclaje estable al correr. La estabilización de la pelvis y la correcta alineación de la columna son cruciales para promover un movimiento más eficiente, reduciendo así el riesgo de lesiones en estos niveles (Harry P. Sciences pharmaceutiques. 2021).

1.6 Biomecánica de la carrera

El sistema musculoesquelético juega un papel esencial y primordial en nuestro organismo. Constituye la principal herramienta de los deportistas, ya sean amateurs o profesionales, y requiere un entrenamiento adecuado para maximizar su potencial, especialmente cuando se participa en una maratón.

La actividad física se puede definir como cualquier movimiento corporal que resulte en un aumento del gasto energético en comparación con el gasto en reposo. Cuando nos movemos, nuestros músculos entran en acción y cuanto más aumenta nuestra actividad física, más se utilizan nuestros músculos.

Los músculos son tejidos formados por fibras que pueden contraerse, esta contracción inducirá el movimiento. Para que todo esto sea posible, los músculos tienen cuatro propiedades importantes :

- Excitabilidad: capacidad de reaccionar ante una estimulación nerviosa.
- Elasticidad: capacidad de volver a su forma inicial después de la contracción.
- Extensibilidad: capacidad de elongación mecánica, pudiendo alejarse lo máximo posible de sus puntos de inserción.
- Plasticidad: capacidad de un músculo para adaptar su estructura al tipo de esfuerzo realizado.

Son los músculos esqueléticos estriados, de contracción voluntaria, los responsables del movimiento. Son esenciales para la adaptación al medio y producen la actividad biomecánica del organismo (Harry P. Sciences pharmaceutiques. 2021).

Es esta biomecánica que va a influir sobre la manera de correr y más precisamente en factores como el patrón de pisada o la cadencia.

El patrón de pisada o “foot-strike pattern” puede dividirse en tres grandes grupos (Almeida, M. O. 2015) cada grupo correspondiendo al nivel del pie que entra en contacto con el suelo en primer lugar:

- Antepie
- Mediapie
- Retropie

Por otro lado, la cadencia es una variable que hace referencia al número de pasos que realiza el atleta durante un minuto. Su valor óptimo para un corredor élite suele ser de 180 pasos por minuto según Quinn et al.

1.7 Las mujeres y la maratón

La relación entre hombres y mujeres que realizan una maratón ha disminuido a lo largo de los años: 5/1 entre 1980 y 1989; 3/1 entre 1990 y 1999; 2/1 entre 2000 y 2009. Estas cifras reflejan un aumento de la población femenina que, sin embargo, sigue siendo inferior a la de los hombres (Lepers & Cattagni, 2012). Existen diferencias físicas y fisiológicas reales entre hombres y mujeres que revelarán divergencias biomecánicas. Por ejemplo, en corredores jóvenes, las diferencias de género en la mecánica de carrera se han examinado como factores que pueden influir en las lesiones. (Ferber et al. 2010). Entre estas diferencias encontramos el tamaño, la masa muscular y ósea, la fuerza, el coste energético (Legro P. 1990).

El propósito de este estudio es investigar el patrón de pisada y la cadencia de las atletas de élite del maratón de Valencia 2023.

2 Hipótesis y Objetivos

La hipótesis de este estudio es que, para un rendimiento óptimo, la mayoría de los corredores de élite van a tener una zancada con un contacto en suelo mediante el medio pie, con una tibia verticalizada. Además, se supone que el tiempo de flexión será más corto que el tiempo de impulso y que la cadencia de estos corredores va a ser superior o igual a 180 pasos por minutos.

En cuanto a este estudio, el objetivo principal es realizar un análisis biomecánico de los corredores de élite de la edición 2023 de la maratón de Valencia.

Los objetivos específicos comprenden:

- Analizar las variables biomecánicas : el apoyo y la inclinación de la tibia.
- Analizar las variables temporales : el tiempo de la fase de frenado, el tiempo de la fase expansiva, el tiempo de vuelo y la cadencia.
- Analizar las variables espaciales : la longitud de la zancada.

3 Material y Método

El presente trabajo se estructura como un estudio observacional que se ha llevado a cabo siguiendo una metodología específica para investigar en detalle los fenómenos subyacentes de la biomecánica de las corredoras de élite de una maratón.

3.1 Participantes

Los datos de análisis fueron recogidos sobre el maratón de Valencia el día 03/12/2023. La hora de salida fue a las 8h15 con un tiempo soleado, una temperatura a la hora de salida de 9°C, un viento de 11 km/h y una humedad de 50%. Durante el estudio, se elige analizar las 50 primeras corredoras que pasaron el kilómetro 33. Las diez primeras atletas acabaron la carrera entre 2h 15min 51s y 2h 23min 27s. Majida Maayouf realizó el récord nacional de España con un tiempo de 2h 21min 27s lo que le permitió obtener la mínima olímpica.

Para que se incluyan los participantes en la observación se necesitan varios criterios que son:

- La atleta debe ser de sexo femenino
- Forma parte de las 50 primeras atletas a pasar el kilómetro 33 de la carrera

Se excluyen del estudio :

- Las atletas que no permiten una correcta análisis de la carrera por falta de visibilidad
- Las participantes que, al pasar la zona de estudio, están caminando (no existe fase de vuelo)

3.2 Protocolo

Se llevó a cabo un estudio en el plano sagital del Maratón de Valencia, una carrera reconocida con la etiqueta Platino de la World Athletics (WA) y distinguida como el mejor Maratón de España por la Real Federación Española de Atletismo (RFEA), lo que garantiza la participación de atletas de alto nivel. El interés mayor es analizar esta carrera de renombre mundial para poder estudiar a atletas de clase mundial compitiendo en un mismo escenario y bajo las mismas condiciones.

Se seleccionó el kilómetro 33, en una recta de 500 metros con una calle larga y amplia. Esta elección se hizo para asegurar una distancia natural entre los corredores y así obtener

imágenes de mejor calidad, evitar tener un gran bloque de corredores, lo que complicaría el análisis. Se representa mediante una flecha roja (Figura 1) el lugar en el que se desarrolló el estudio.

Una vez hecha la verificación del sitio en condiciones parecidas a las de la carrera del día siguiente, se pusieron los marcadores sobre el suelo. Se puso sobre el suelo un rectángulo de 6 por 4 metros. Se elige poner esparadrapo blanco para que se vea bien con respecto al suelo que es negro. Se añade 2 puntos de esparadrapo en el medio de las líneas del rectángulo (a 3 metros) para facilitar la medición. Se realizó una representación esquemática de la zona de grabación (Figura 2).

Se colocaron dos cámaras. Una de la marca Gopro, el modelo hero 8 black y un Iphone 11 sobre trípode, a una altura de 75 cm desde el suelo. Son cámaras de alta resolución con la cual se grabó en 240 imágenes por segundos a 1080 HP. Se dispone las cámaras una en frente de la otra, a la mitad del espacio delimitado, en un plano sagital al sentido de la carrera para tener la mejor visibilidad posible para realizar el análisis (Figura 2).



Figura 1 : Recorrido de la maratón de Valencia 2023

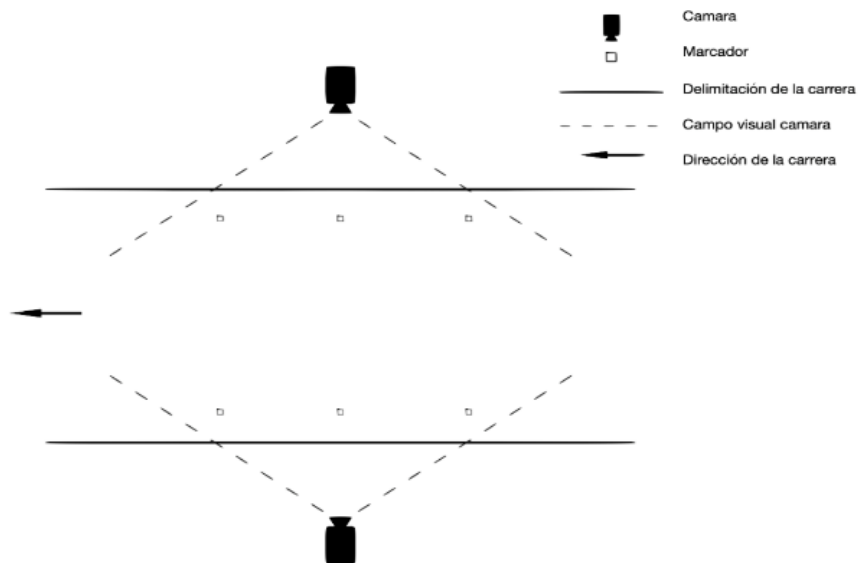


Figura 2: Representación esquemática de la zona de grabación video del estudio

3.3 Procesamiento de datos

Se utilizó la versión 0.9.5 de Kinovea (Fernández-González P., 2020) para analizar los videos. Se examinaron tres categorías de variables : categóricas, temporales y espaciales. El análisis fue llevado a cabo por dos observadores independientes, M.H. y T.R. La muestra de 49 corredoras se dividió en dos grupos: uno de 24 atletas y otro de 25. El primer grupo (Grupo A) consta de las 24 corredoras iniciales (n=24), mientras que el segundo grupo (Grupo 2) está compuesto por las 25 corredoras siguientes (n=25). Los datos fueron compilados en una tabla Excel la cual está compuesta de una serie de datos entre las cuales hay las variables temporales y categóricas (Tabla 1).

1	KM	clasificación	ATLETA	MARCA	PIE (I/D)	TIEMPO CONTACTO SUMA	TIEMPO DE FLEXIÓN	TIEMPO IMPULSO	TIEMPO VUELO	DUTY FACTOR	SWING TIME	PASOS	TIEMPO	TIEMPO S	CADENCIA	CADENCIA Hz	LONGITUD PASO (M)	FSA	INCLINACIÓN TIBIA
2		1			D	0				#DIV/0!				0	#DIV/0!	#DIV/0!			
3		1			I	0				#DIV/0!				0	#DIV/0!	#DIV/0!			
4		2			D														
5		2			I														

Tabla 1: Tabla Excel de procesamiento de datos

Se utilizó el software JAMOVI (The jamovi project (2024). jamovi (Version 2.5) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>) para la obtención de resultados en forma de tabla y gráficos. Esta misma herramienta ha sido utilizada para obtener una comparación de las variables espaciales y temporales entre los grupos 1 y 2 para determinar si existían diferencias significativas en función del nivel deportivo ($p < 0.05$), dado que se cumplían las suposiciones paramétricas.

3.3.1 Variables categóricas

3.3.1.1 Apoyo

Se analizó el patrón de apoyo de las atletas siguiendo una metodología similar a la empleada por Souza, R. B. (2016). Este enfoque resalta la importancia de examinar el apoyo durante la primera fase de carga, como se ilustra en la figura 4, donde se observa una deformación en la suela de la zapatilla considerando su caída (drop). Para clasificar el tipo de apoyo de cada atleta, se ha seguido el mismo procedimiento utilizado por Hanley et al. (2019). En el apoyo retropié (RFS), el talón es el primer punto de contacto con el suelo. En el apoyo mediopié (MFS), el pie hace contacto de manera uniforme y paralela al suelo. En el apoyo antepié (FFS), el primer contacto se realiza con la parte delantera del pie, sin que el talón toque el suelo. Los distintos tipos de apoyo (FFS, MFS, RFS) se pueden observar en las figuras 3, 4 y 5, respectivamente.

3.3.1.2 Inclinación de la tibia

Para evaluar la inclinación de la tibia, se utiliza la posición de la rótula con respecto a un marcador perpendicular al suelo y que pasa por el maléolo tibial o peroneal. Cuando la rótula está detrás del marcador, esto sugiere que la tibia está en extensión, tal como se muestra en la Figura 5. Cuando la rótula se alinea con el marcador, se considera que la tibia está en una posición vertical, como se puede observar en las Figuras 3 (Souza et al., 2016).

3.3.2 Variables temporales

Utilizando el enfoque metodológico similar al presentado por (Pipkin A., 2016), se procedió a evaluar cada etapa desde el contacto inicial del pie hasta su despegue. Este proceso se dividió en dos fases distintas : la primera fase, correspondiente al frenado o fase excéntrica, y la segunda fase, conocida como fase concéntrica o de impulso.

3.3.2.1 Fase excéntrica

La fase excéntrica comienza desde el momento en que la zapatilla contacta con el suelo hasta que la rodilla contralateral alcanza el mismo nivel (fémures paralelos) en un plano sagital que la rodilla de la pierna apoyada. Es crucial destacar que la fase excéntrica es clave en la zancada, ya que durante este período el sistema musculoesquelético experimenta una carga considerable (Pipkin A., 2016).

3.3.2.2 Fase concéntrica

Comienza cuando las rodillas alcanzan el mismo nivel en el plano sagital y concluye en el momento en que el pie se despegaba del suelo (Pipkin A., 2016). Esta etapa facilita la propulsión hacia adelante del cuerpo, preparándolo para el siguiente paso.

3.3.2.3 Tiempo de vuelo

Respecto a la fase de vuelo, corresponde al periodo entre el despegue del pie A (final de la fase concéntrica) y el apoyo del pie B (inicio de la fase excéntrica). Durante este ciclo, no hay contacto del atleta con el suelo (Ortega D. R., 2019).

3.3.2.4 Cadencia

La cadencia se define como la cantidad de pasos por minuto. Para su cálculo, se ha empleado la siguiente fórmula: (número de pasos x 60 segundos) dividido por el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos, conocido como tiempo de doble paso.

3.3.3 Variable espacial

3.3.3.1 Longitud de paso

Para determinar una distancia en Kinovea, es necesario calibrar el software mediante la colocación de marcadores en el suelo. Para calcular la longitud de la zancada del paso izquierdo, se mide la distancia desde la punta del pie izquierdo antes del despegue hasta la punta del pie derecho al final de la fase excéntrica de la pierna derecha. Del mismo modo, para calcular la longitud de la zancada del paso derecho, se mide la distancia desde la punta del pie derecho antes del despegue hasta la punta del pie izquierdo al final de la fase excéntrica de la pierna derecha.



Figura 3: apoyo FFS, tibia vertical



Figura 4: apoyo MFS, tibia vertical



Figura 5: apoyo RFS, tibia en extensión

4 Resultados

4.1 Resultados de las 50 primeras atletas

4.1.1 Variables categóricas

El análisis bidimensional de las 50 primeras atletas reveló al nivel de las variables categóricas que el patrón de apoyo más utilizado es el MFS con 52%, seguido por el RFS con 43,9% y finalmente el FFS con 4,1% (Tabla 2).

FSA	Frecuencias	% del Total	% Acumulado
1 (RFS)	43	43.9 %	43.9 %
2 (MFS)	51	52.0 %	95.9 %
3 (FFS)	4	4.1 %	100.0 %

Tabla 2: Frecuencias de FSA

En cuanto a la inclinación de la tibia de la población estudiada, la proporción de tibia vertical es de 65,3% y en extensión 34,7% (Tabla 3).

INCLINACIÓN TIBIA	Frecuencias	% del Total	% Acumulado
1 (tibia en extensión)	34	34.7 %	34.7 %
2 (tibia vertical)	64	65.3 %	100.0 %

Tabla 3: Frecuencias de inclinación tibial

4.1.2 Variables temporales

	CADENCIA	TIEMPO CONTACTO SUMA	TIEMPO DE FLEXIÓN	TIEMPO IMPULSO	TIEMPO VUELO	DUTY FACTOR	LONGITUD PASO (M)
N	98	98	98	98	98	98	98
Perdidos	2	2	2	2	2	2	2
Media	187	190	82.0	108	130	0.593	1.54
Desviación estándar	8.64	16.2	12.0	8.74	16.9	0.0451	0.114
Mínimo	172	149	56.0	87.0	70.0	0.454	1.08
Máximo	212	240	120	129	179	0.765	1.70

Tabla 4: tabla descriptiva de las variables temporales

En lo que respecta a las variables temporales, se ha registrado que el tiempo de contacto promedio se sitúa en 190 milisegundos (ms) (Figura 6), con un tiempo medio de flexión de 82 ms (Figura 7). Por otro lado, se ha observado que el tiempo medio de la fase de impulso es de 108 ms (Figura 8), mientras que el tiempo medio de la fase de vuelo es de 130 ms (Figura 9). En cuanto a la cadencia, se ha calculado un promedio de 187 pasos por minuto (ppm) (Figura 10).

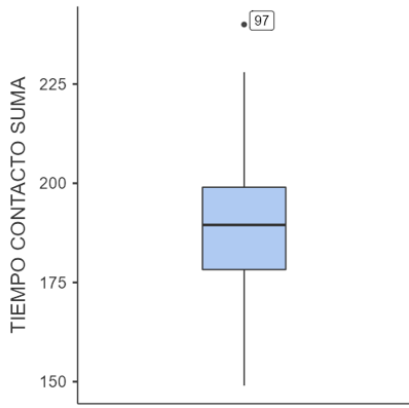


Figura 6 : Box plot tiempo de contacto de grupos 1 y 2

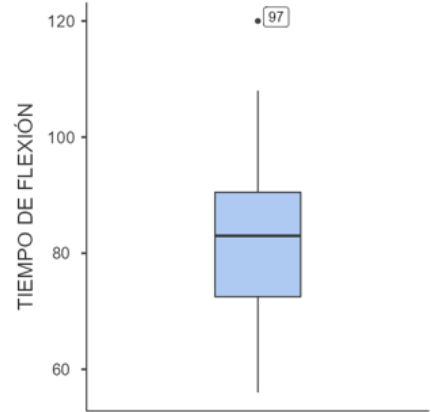


Figura 7 : Box plot tiempo de flexión de

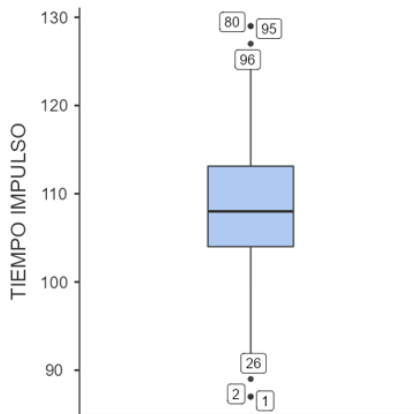


Figura 8 : Box plot tiempo de impluso de grupos 1 y 2

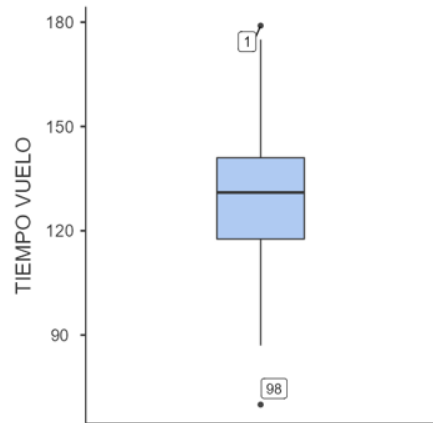


Figura 9 : Box plot tiempo de vuelo de

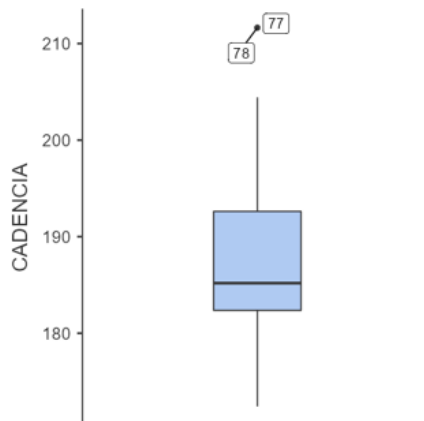


Figura 10 : Box plot cadencia de grupos 1 y 2

4.1.3 Variables espaciales

La longitud de paso media en las mujeres elite de la maratón de Valencia 2023 es de 1,54 metros (Figura 11).

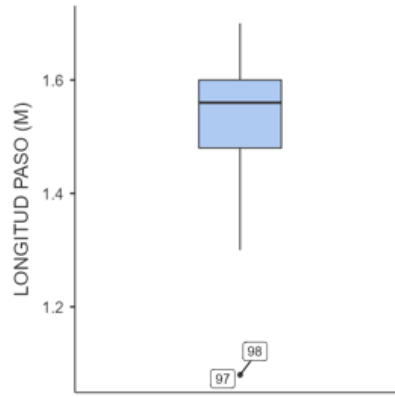


Figura 11 : Box plot longitud de paso

4.2 Resultados comparativos entre el grupo 1 y grupo 2

4.2.1 Variables categóricas

El análisis muestra que el tipo de apoyo más representado en el grupo 1 es el tipo retro pie con poca diferencia con respecto al tipo medio pie. En el grupo 2, el apoyo tipo medio pie es más presente que los otros (Figura 12).

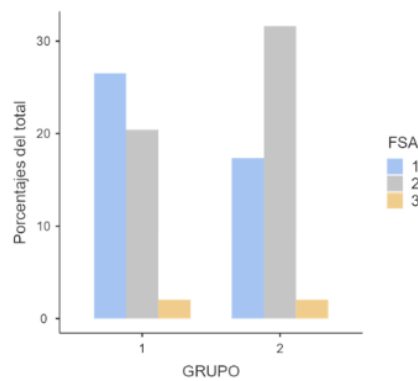


Figura 12 : repartición de los tipos de FSA en los grupos 1 y 2

En el primer grupo, la repartición de las tibias verticales y en extensión presenta pocas divergencias con respecto al grupo 2 en el cual las tibias verticales están representadas en gran mayoría (Figura 13).

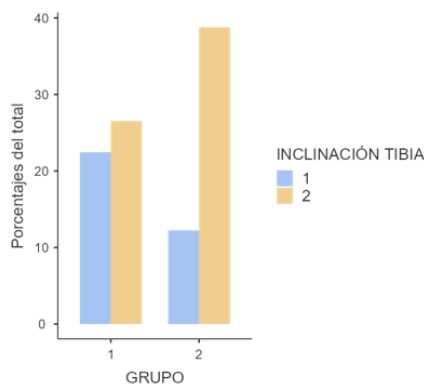


Figura 13 : repetición de la inclinación de tibia en los grupos 1 y 2

4.2.2 Variables temporales

Descriptivas de Grupo

	Grupo	N	Media	Mediana	DE	EE
LONGITUD PASO (M)	1	48	1.596	1.600	0.0721	0.01040
	2	50	1.490	1.490	0.1227	0.01735
CADENCIA	1	48	185.774	184.615	7.1726	1.03527
	2	50	189.041	188.978	9.6555	1.36549
TIEMPO CONTACTO SUMA	1	48	189.302	188.500	16.4300	2.37146
	2	50	190.720	189.500	16.0859	2.27489
TIEMPO DE FLEXIÓN	1	48	81.729	83.000	12.4388	1.79538
	2	50	82.210	83.000	11.7304	1.65893
TIEMPO IMPULSO	1	48	107.573	108.000	8.8414	1.27614
	2	50	108.510	108.000	8.7152	1.23251
TIEMPO VUELO	1	48	133.854	134.000	16.7415	2.41642
	2	50	127.250	129.000	16.5206	2.33637
DUTY FACTOR	1	48	0.586	0.593	0.0461	0.00666
	2	50	0.600	0.593	0.0435	0.00616

Tabla 5: Tabla descriptiva de las variables temporales comparando los 2 grupos

Comparando los dos grupos, se observa que el tiempo de contacto medio varía entre 189.302 milisegundos (ms) para el grupo 1 y 190.720 ms para el grupo 2. El tiempo medio de flexión es respectivamente de 81.729 ms y 82.210 ms. Además, se ha observado que el tiempo medio de la fase de impulso es de 107.573 ms en las 25 primeras atletas y 108.510 ms en las 25 siguientes. Con respecto al tiempo medio de la fase de vuelo es de 133.854 ms en el primer grupo y 127.250 ms en el segundo. En cuanto a la cadencia, se ha calculado un promedio de 185.774 pasos por minuto (ppm) y 189.978 ppm en ambos grupos. (Tabla 5)

4.2.3 Variables espaciales

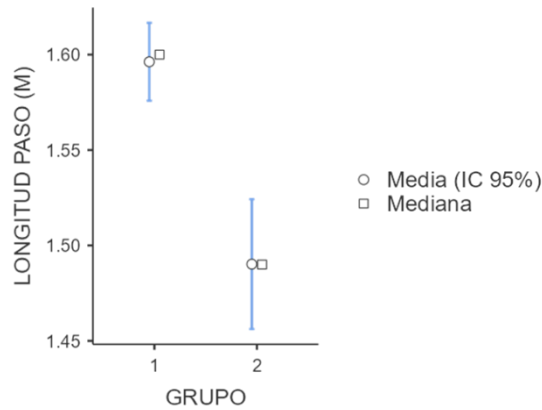


Figura 14.: Diagrama representativo de las longitudes de pasos entre los grupos 1 y 2

En el primer grupo, la longitud de paso media es de 1,596 m y en el segundo 1,490 m lo que constituye una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.001$) entre ambos grupos (Figura 14, Tabla 6).

		Estadístico	gl	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia
LONGITUD PASO (M)	T de Student	5.189	96.0	< .001	0.1060	0.02044
CADENCIA	T de Student	-1.895 *	96.0	0.061	-3.2670	1.72381
TIEMPO CONTACTO SUMA	T de Student	-0.432	96.0	0.667	-1.4179	3.28474
TIEMPO DE FLEXIÓN	T de Student	-0.197	96.0	0.844	-0.4808	2.44152
TIEMPO IMPULSO	T de Student	-0.528	96.0	0.598	-0.9371	1.77363
TIEMPO VUELO	T de Student	1.965	96.0	0.052	6.6042	3.36029
DUTY FACTOR	T de Student	-1.558	96.0	0.123	-0.0141	0.00906

Nota. $H_0: \mu_1 = \mu_2$

* La prueba de Levene significativa ($p < 0.05$) sugiere que las varianzas no son iguales

Tabla 6.: Prueba T de Student comparativa de los grupos 1 y 2 aplicada a las variables temporales y espaciales

5 Discusión

La RE desempeña un papel crucial en el rendimiento de las carreras de larga distancia como una maratón. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión de las variables categóricas, temporales y espaciales que influyen en el rendimiento, así como su impacto en la RE.

Los hallazgos de esta investigación respaldan nuestras suposiciones, indicando que la mayoría de los corredores de élite adoptan un tipo de apoyo medio pie, con una tibia en posición vertical. Es una técnica de alto rendimiento empleada en las carreras de larga distancia que son cada vez más rápidas y que podría resultar más beneficiosa para la eficiencia energética (Hasegawa H., 2007; Larson et al., 2013).

De hecho, se nota que en lo que respecta al tipo de apoyo, el predominante es el medio pie, seguido por el retropié y el antepié, con frecuencias del 52%, 43,9% y 4,1%, respectivamente. Por otro lado, el apoyo FFS es poco empleado en este tipo de distancia y se suele utilizar en otro tipo de disciplina del atletismo como en el sprint. Se podría justificar este hecho por una mayor sollicitación muscular que influye en la RE y que por lo tanto complica su uso en carreras largas (Ahn et al., 2014). El apoyo RFS conlleva un mayor riesgo de lesiones por sobreuso del sistema locomotor en comparación con el apoyo MFS o FFS (Daoud., et al 2012). En la investigación de Hasegawa et al. (2007) se observa una tendencia hacia al apoyo RFS (74.9%). Esta disparidad significativa con nuestro estudio podría explicarse por la selección de los atletas, ya que los participantes analizados en esta investigación son exclusivamente atletas de élite a nivel mundial.

En este análisis, se ha notado que la mayoría de los atletas tienen la tibia en posición vertical (65,3%), en contraste con una tibia extendida (34,7%). Esta postura de la tibia, junto con una rodilla flexionada, permite al atleta reducir las cargas sobre el sistema musculoesquelético, reduciendo así el riesgo de lesiones por impacto, mejorando así su eficiencia energética. Esto ha sido respaldado por estudios previos (Pipkin et al., 2016; Souza et al., 2016; Folland et al., 2017).

En cuanto al grupo A, se observa una media de fase de impulso de 107.573 ms y de tiempo de contacto de 189.302 ms mientras que con el grupo B el tiempo medio de la fase de impulso es de 108.510 ms y el tiempo total de contacto es de 190.720 ms. Se ha demostrado que el aumento del tiempo de contacto es inversamente proporcional al coste metabólico durante la carrera. Por consiguiente, un tiempo de contacto reducido permite una optimización del rendimiento (Di Michele et al., 2014).

Los resultados del análisis indican una cadencia ligeramente superior a la que habíamos supuesto con 187 ppm contra 180 ppm según nuestra hipótesis. Sin embargo, una cadencia superior a 180 ppm permite reducir las fuerzas de impactos sobre las articulaciones y por tanto limita el riesgo de lesiones (Wang et al., 2020; Dubois et al., 2019).

6 Limitaciones

Dado que es un análisis en un contexto real, varios parámetros no pueden ser considerados. La grabación bidimensional limita la valoración de algunos aspectos biomecánicos

que no pertenezcan al plano sagital como el valgo/varo de rodilla, la inclinación lateral del tronco y la pronación/supinación del pie que son variables adicionales que influyen en la pisada de las corredoras.

El modo estudio no permite poner marcadores sobre los atletas impidiendo el cálculo exacto de varios ángulos del patrón de su carrera y la oscilación vertical del atleta y limita la precisión de los cálculos realizados en este estudio.

La mayoría de las zapatillas llevadas por los atletas durante las carreras presentan un *drop* alto lo que complica el análisis del tipo de apoyo del corredor. Un *drop* más alto implica un contacto previo con la parte posterior de la zapatilla alterando la biomecánica natural del corredor. Ese parámetro no ha sido tenido en cuenta en este estudio.

Además, dado a la reputación de la carrera, hay muchos factores externos que limitan una buena visibilidad de los atletas y alteran el análisis de estos mismos como los vehículos que rodean los atletas y los grupos densos de corredores en los cuales se ocultan algunos de ellos.

Por fin, no tenemos informaciones personales y factores intrínsecos de cada atleta como la edad, la experiencia personal, el tipo de preparación realizada, las lesiones previas y actuales que podrían influir en los resultados del estudio.

7 Conclusión

Este estudio experimental observacional ha permitido destacar unos datos importantes y relevantes de las atletas femeninas de élite que compiten en carreras de larga distancia. La primera variable categórica observada se relaciona con el tipo de apoyo, el más representado siendo el MFS (52%), seguido por la posición de la tibia en el momento de contacto que es vertical en la mayoría de los casos (65,3%). Asimismo, la cadencia media de las corredoras es superior a los 180 ppm (187 ppm) y el tiempo de flexión (82 ms) es más corto que el tiempo de impulso (108 ms). Se observa una diferencia significativa entre ambos grupos sobre las variables espaciales, como la longitud de paso ($p < 0.001$). Por lo tanto, la optimización de esta variable podría ser beneficiosa sobre el rendimiento de las atletas.

Comparando los grupos 1 y 2, podemos afirmar que un apoyo MFS, una tibia vertical, un tiempo de impulso cerca de 107 ms, un tiempo de contacto total cerca 189 ms, una longitud de paso cerca de 1.59 m y una cadencia media de 185 ppm representan las variables más óptimas para la mejor RE de una maratón.

En futuros estudios, se podría considerar realizar análisis en varios puntos del recorrido de la maratón para determinar el efecto de la fatiga en el patrón de carrera (o RE) del atleta.

8 Bibliografía

Ahn, A. N., Brayton, C., Bhatia, T., & Martin, P. (2014). Muscle activity and kinematics of forefoot and rearfoot strike runners. *Journal of Sport and Health Science*, 3(2), 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.03.007>

Almeida, M. O., Davis, I. S., & Lopes, A. D. (2015). Biomechanical Differences of Foot-Strike Patterns During Running: A Systematic Review With Meta-analysis. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 45(10), 738–755. <https://doi.org/10.2519/jospt.2015.6019>

Arnold, M. J., & Moody, A. L. (2018). Common running injuries: Evaluation and management. *American Family Physician*, 97(8), 510–516. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29671490/>

ATHLE.FR | Le running, valeur sûre pendant la crise. (s. d.). <https://www.athle.fr/asp.net/main.news/news.aspx?newsid=18185>

Burke, L. M., Jeukendrup, A. E., Jones, A. M., & Mooses, M. (2019). Contemporary Nutrition Strategies to Optimize Performance in Distance Runners and Race Walkers. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 29(2), 117–129. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2019-0004>

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>

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*, 17(4), 414–418. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.05.012>

Fernández-González, P., Koutsou, A., Cuesta-Gómez, A., Carratalá-Tejada, M., Miangolarra-Page, J. C., & Molina-Rueda, F. (2020). Reliability of Kinovea® software and agreement with a three-dimensional motion system for gait analysis in healthy subjects. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(11), 3154. <https://doi.org/10.3390/s20113154>

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*, 92, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.05.024>

Harry, P. (2021). Conseils et accompagnement du sportif marathonien à l'officine. *Sciences pharmaceutiques*. dumas-03573693

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. <https://doi.org/10.1519/r-22096.1>

Kakouris N., Yener N., Fong DTP. A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners. *J Sport Health Sci* 2021;10:513–22. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.04.001>.]

Lepers, R., & Cattagni, T. (2011). Do older athletes reach limits in their performance during marathon running? *Age*, 34(3), 773-781. <https://doi.org/10.1007/s11357-011-9271-z>

Ortega, D. R. (2019). Análisis temporal de las distintas fases del ciclo de carrera en corredores recreacionales. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7293956>

Pipkin, A., Kotecki, K., Hetzel, S., & Heiderscheid, B. (2016). Reliability of a Qualitative Video Analysis for Running. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 46(7), 556–561. <https://doi.org/10.2519/jospt.2016.6280>

Quinn, T. J., Dempsey, S. L., LaRoche, D. P., Mackenzie, A. M., & Cook, S. B. (2021). Step frequency training improves running economy in well-trained female runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(9), 2511–2517. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000003206>

Senefeld, J. W., Haischer, M. H., Jones, A. M., Wiggins, C. C., Beilfuss, R., Joyner, M. J., & Hunter, S. K. (2021). Technological advances in elite marathon performance. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 130(6), 2002–2008. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00002.2021>

Souza, R. B. (2016). An evidence-based videotaped running biomechanics analysis. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 27(1), 217–236. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.08.006>

Teixeira, R. N., Lunardi, A., da Silva, R. A., Lopes, A. D., & Carvalho, C. R. (2016). PREVALENCE OF MUSCULOSKELETAL PAIN IN MARATHON RUNNERS WHO COMPETE AT THE ELITE LEVEL. *International journal of sports physical therapy*, 11(1), 126–131.

The jamovi project (2024). jamovi (Version 2.5) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>

Thurgood, G., Sapstead, G., & Stankiewicz, C. (2014). *Running & marathon : l'intégrale*.

Wang, J., Luo, Z., Dai, B., & Fu, W. (2020). Effects of 12-week cadence retraining on impact peak, load rates and lower extremity biomechanics in running. *PeerJ*, 8(e9813), e9813. <https://doi.org/10.7717/peerj.9813>

Xu, Y., Yuan, P., Wang, R., Wang, D., Liu, J., & Zhou, H. (2021). Effects of Foot Strike Techniques on Running Biomechanics: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports health*, 13(1), 71–77. <https://doi.org/10.1177/1941738120934715>