



**Facultad de
Ciencias de la Salud
y del Deporte - Huesca**
Universidad Zaragoza

Impacto de la tecnología de zapatillas con placa de fibra de carbono sobre índices de rendimiento en corredores entrenados

Impact of carbon fiber plate shoe technology on indices of performance in well-trained runners

Grado Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

Trabajo Fin de Grado

Curso 2021/2022

Autor: Diego Vidal Roldán

Tutor: Borja Muñiz Pardos

Área de Educación Física y Deportiva

Resumen

Introducción: En 2016 se introduce la placa de fibra de carbono (PFC) en el calzado deportivo con el objetivo de mejorar el rendimiento de los atletas. Su impacto ha sido tal que se han batido todos los récords desde 5km hasta maratón, en carreras en ruta durante los últimos 4 años, usando zapatillas con esta tecnología. **Objetivo:** Examinar el impacto de la tecnología de PFC sobre los índices de rendimiento, con especial atención a la economía de la carrera, la percepción subjetiva del esfuerzo y las variables fisiológicas en corredores muy entrenados. **Material y métodos:** En este estudio participaron un total de 10 atletas, todos ellos corredores altamente entrenados ($VO_{2m\acute{a}x}=69,4\pm 7,3\text{ml/kg/min}$). El estudio incluyó dos visitas: en la primera visita, se realizó una prueba de esfuerzo máxima para determinar el consumo máximo de oxígeno y el umbral anaeróbico, y un test de familiarización con las condiciones de calzado (Zapatillas con PFC y zapatillas de competición tradicionales); en la segunda visita, cada atleta realizó 1 serie de 6 minutos al 95% del umbral anaeróbico con cada condición de calzado, con un descanso de 10 minutos. Durante cada tanda de ejercicio, se evaluó la percepción de esfuerzo, el lactato en sangre, variables biomecánicas del pie y el consumo de oxígeno. **Resultados:** No se encontraron diferencias significativas ($p>0,005$) entre las variables analizadas para comparar las dos condiciones de calzado: economía de carrera, respuesta metabólica y perceptual, y biomecánica. **Conclusiones:** A pesar de no haber encontrado las mejoras esperadas, este estudio puede servir de precedente para un estudio donde la muestra este formada por atletas familiarizados con PFC y capaces de correr a velocidades elevadas.

Palabras clave: Calzado deportivo, placa de fibra de carbono, corredores entrenados, rendimiento y economía de carrera.

Abstract

Introduction: In 2016, the carbon fiber plate was introduced and used for the first time in sports shoes with the aim of improving athletes' performance. Moreover, this plate has had such an enormous impact on their performance that all records have been broken from 5km to marathon in road races thanks to this shoes' technology. **Objective:** The purpose is to examine the impact of carbon fiber plate technology on performance indices by paying close attention to the running economy, the self-perceived exertion and the physiological variables in well-trained runners. **Material and methods:** A total of 10 athletes have participated in this study; all of them are well-trained runners ($VO_2\text{máx}=69,4\pm 7,3\text{ml/kg/min}$). The study includes two visits. In the first visit, a highest effort test was taken so as to determine the highest oxygen consumption as well as the anaerobic threshold; and by the same token, a familiarization test was taken taking into account both shoe conditions (trainers with the carbon fiber plate and traditional trainers used in competitions). Whereas in the second visit, each athlete performed 1 series of 6 minutes each at 95% of the anaerobic threshold with each shoe condition with a break of 10 minutes. After each series, effort perception, blood lactate levels, biomechanical foot variables and oxygen consumption were evaluated and assessed. **Results:** No significant differences were found between the analyzed variables ($p>0.005$) to compare the two footwear conditions: running economy, metabolic and perceptual response and biomechanics. **Conclusions:** Despite not having found the expected improvements, this study may serve as a previous step to another study where the sample could be made up of athletes who are familiarized with the carbon fiber plate and able to run at high speeds.

Key words: Sports shoes, carbon fiber plate, well-trained runners, performance and race economy.

Índice

1. Introducción.....	6
1.2 Justificación	9
2. Marco teórico.....	11
3. Hipótesis	14
4. Objetivo	15
5. Material y métodos	15
5.1 Características de la muestra.....	15
5.2 Condiciones de calzado.....	16
5.3 Diseño experimental	17
5.3.1 Visita 1 - Prueba de consumo máximo de oxígeno y umbral ventilatorio	17
5.3.2 Visita 2 - Pruebas de economía de carrera	18
5.4 Análisis estadístico	20
6. Resultados.....	21
6.1 Características de la muestra.....	22
6.2 Economía de carrera	23
6.3 Respuesta metabólica y perceptual	25
6.4 Biomecánica.....	28
7. Discusión	31
8. Conclusiones.....	37
9. Bibliografía.....	38

10. Anexos.....	43
10.1 Resolución favorable CEICA	43
10.2 Consentimiento informado	44
10.3 Instrumento de recogida de datos – Visita 1	50
10.4 Instrumento de recogida de datos – Visita 2.....	51
10.5 Escala de Borg	52

1. Introducción

En los últimos 30 años se ha producido una mejora considerable, 5 minutos en hombres y 7 minutos en mujeres, en los tiempos de la maratón. Para conocer cuáles han sido los factores más determinante que pueden explicar estas mejoras es necesario conocer las principales características que debe poseer un corredor para ser un buen maratoniano. Los principales factores del rendimiento en el ejercicio de resistencia, de acuerdo con Joyner y colaboradores (2020), son:

- Consumo máximo de oxígeno: Establece el límite superior del metabolismo aeróbico (Joyner, 1991).
- Umbral anaeróbico: Fracción máxima de VO_2 máx que un atleta puede sostener en eventos competitivos superiores a 3000m (Joyner, 1991).
- Economía de carrera: Consumo de oxígeno a una intensidad fija submáxima (típicamente a velocidad de maratón o ligeramente por debajo).

La clave del éxito en carreras de resistencia reside en la convergencia de estos 3 factores. Esta afirmación se refleja en que las mejores marcas del mundo en maratón corresponden a excelentes atletas con un alto consumo de oxígeno y un alto umbral anaeróbico, capaces de mantener altas velocidades submáximas gracias a una buena economía de carrera (Joyner et al., 2020). La diferencia entre el récord mundial masculino y femenino apenas ha variado en los últimos años, reflejándose así las diferencias fisiológicas entre ambos sexos. El consumo máximo de oxígeno es la principal diferencia, siendo mayor en los hombres debido a un mayor tamaño del corazón (mayor volumen sistólico), más masa muscular, menos grasa corporal y una mayor concentración de hemoglobina en sangre (Joyner & Coyle, 2008).

Ya hace más de 30 años, Joyner (1991) realizó una predicción matemática del mejor tiempo posible en el que el ser humano podría correr una maratón, estableciendo un límite fisiológico de 1 hora 57 minutos y 48 segundos. Joyner señalaba a partir de modelos matemáticos que dicha marca podría ser posible si el corredor poseía, al menos, un VO_2 máx de 84ml/kg/min, un umbral anaeróbico al 85% del VO_2 máx y una excelente economía de carrera.

En base a estas estimaciones y comparando el récord oficial de maratón masculino (2:01:39) con el predicho por Joyner (1:57:48) se observa que todavía existe una diferencia de casi 4 minutos. No obstante, cabe destacar que Joyner no tuvo en cuenta la ventaja no fisiológica que podría proporcionar un nuevo calzado deportivo que aparecería más tarde, en el año 2016.

Durante los Juegos Olímpicos de Río de Janeiro 2016, apareció por primera vez el modelo pionero de zapatilla con placa de fibra de carbono en competición, Nike Zoom Vaporfly, aunque no fue hasta el 2017 y con el desarrollo del proyecto Breaking2 de Nike, cuando la marca intentó batir el récord de las 2 horas en maratón con el atleta keniano Eliud Kipchoge calzando las Nike ZoomX Vaporfly 4%, el tiempo logrado fue de 2:00:25.

Dos años más tarde en 2019, el propio Eliud Kipchoge fue el encargado de romper la barrera de las 2 horas en maratón (1:59:40) en un evento realizado en Viena. Para ello Kipchoge utilizó las zapatillas Nike Air Zoom Alphafly NEXT%. El órgano rector del atletismo mundial optó por modificar el reglamento para regular el uso de este tipo de tecnología, estableciendo un límite de 40mm de grosor de suela y el uso de una única placa de fibra de carbono (Navarro, 2020).

Según Rodrigo-Carranza y colaboradores (2021) hasta 2014 el récord mundial solo había mejorado un 3,06% en los 25 años anteriores. Sin embargo, tras el lanzamiento de esta

nueva tecnología de calzado, los récords mundiales mejoraron un 1,06% y un 1,00% para hombres y mujeres, en solo cinco años. Bermon y colaboradores (2021) afirman que desde 2017 los mejores tiempos de la temporada han disminuido para 10k, media maratón y maratón en ambos géneros, siendo mayor la magnitud de cambio en mujeres que en hombres y en maratón que en 10k.

Esta nueva tecnología no solo ha afectado a los mejores tiempos de la temporada, también ha tenido repercusión directa sobre los récords mundiales. Desde el lanzamiento de la placa de fibra de carbono en 2016 por Nike, se han batido todos los récords desde los 5 kilómetros hasta la maratón, en todos los nuevos récords se han utilizado zapatillas con placa de fibra de carbono (Muñiz-Pardos et al., 2021).

Un estudio reciente se ha centrado en los posibles motivos que pueden explicar los récords batidos en un periodo tan corto de tiempo (Joyner et al., 2020), destacando:

- **Drafting:** Mediante la disposición de un equipo de corredores colocados estratégicamente para reducir la resistencia del viento.
- **Recorrido:** Seleccionando un recorrido llano con pocos giros.
- **Nutrición:** Optimizando la ingesta de carbohidratos para facilitar la máxima disponibilidad de este sustrato.
- **Calzado deportivo:** La utilización de la placa de fibra de carbono en la entresuela ha demostrado mejorar un 4% la economía de carrera (Hoogkamer et al., 2018).

La utilización de zapatillas con esta nueva tecnología ha reflejado una mejora del 1% en los tiempos de maratón para aquellos atletas que las utilizaron frente a los corredores que no, manteniéndose estables el resto de los factores: condiciones externas, ambientales, edad o lugar de nacimiento (Rodrigo-Carranza et al., 2021). Existen indicios de que es poco probable que las mejoras recientes en los tiempos de carrera sean debido a cambios

biológicos (Muñiz-Pardos et al., 2021). Los nuevos modelos de calzado deportivo han tenido un claro impacto en el rendimiento de la maratón, estas mejoras se deben a la mejora de la economía de carrera con este tipo de calzado (Rodrigo-Carranza et al., 2021).

1.2 Justificación

A lo largo de los 4 años del Grado, he tenido la oportunidad de vivenciar la gran variedad de contenidos que en él se incluyen; realizando actividades relacionadas con la iniciación al deporte, los diferentes métodos de enseñanza-aprendizaje, el entrenamiento para la salud y el entrenamiento y la optimización del rendimiento. Este último ámbito ha sido el más motivante para mi formación debido a que recoge contenidos innovadores y la posibilidad de trabajar con atletas de élite.

El entrenamiento y la optimización del rendimiento conlleva para el graduado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte la búsqueda constante de información relevante y contrastada. El proceso a través del cual se obtiene dicho conocimiento es a partir de la investigación científica, aunque esta actividad es de difícil accesibilidad en el ámbito universitario debido al elevado número de alumnos. Se trata de una herramienta muy útil para fomentar el aprendizaje y reforzar los contenidos, como se muestra en las siguientes afirmaciones:

- Aprender investigando permite profundizar en temáticas que inquietan e interesan a los estudiantes. A pesar de que las experiencias escolares de investigación destacan por su precariedad, brevedad y circunscripción a situaciones puntuales, existe un elevado nivel de satisfacción de los estudiantes que participan en la experiencia de investigación (Pozuelos Estrada & Travé González, 2004).
- El aprendizaje de las ciencias basado en el modelo de aprendizaje por investigación otorga la posibilidad a estudiantes y docentes de aproximarse al

conocimiento de la misma manera que lo hacen los investigadores. A través de esta metodología se permite establecer metas y objetivos mucho más concretos y viables que facilitan el desarrollo de competencias científicas. (García & Ladino, 2008).

Siguiendo estas líneas de pensamiento, el Trabajo de Fin de Grado es la oportunidad perfecta para reforzar las habilidades en la investigación científica y los conocimientos sobre el rendimiento deportivo. La temática escogida para realizar dicha aproximación al campo de la investigación es el análisis del rendimiento en corredores altamente entrenados, comparando un modelo de calzado con placa de fibra de carbono y un modelo sin placa de fibra de carbono.

2. Marco teórico

Entre la variedad de disciplinas que forman el atletismo se encuentran las pruebas de resistencia, fondo o de larga distancia. Dependiendo de la distancia a recorrer, las pruebas se dividen en medio fondo, que comprende pruebas entre los 800 y 3000m, y las pruebas de fondo que incluyen desde los 5000m hasta la maratón. Existe un constante incremento en la calidad de las marcas deportivas para conseguir el dominio tanto en el ámbito nacional como internacional (Infante-Ojeda et al., 2017).

Existe un amplio abanico de factores sobre el rendimiento en carreras de fondo, el óptimo rendimiento en este tipo de carreras no sólo está determinado por multitud de parámetros, sino por la interrelación entre todos ellos (Ogueta-Alday & García-López, 2016). Los principales factores de rendimiento son los siguientes:

1. Ambientales (Viento, temperatura, humedad, altura y pendiente del terreno).
2. Ligados al entrenamiento (Entrenamiento de resistencia, fuerza, en ambientes calurosos y en altura).
3. Fisiológicos (VO_2 máx, umbrales ventilatorios, economía de carrera, edad, género, tipos de fibras musculares, fatiga y raza).
4. Biomecánicos (Antropometría, leg-stiffness, flexibilidad, patrón de pisada, **calzado**, ortesis plantares y parámetros espaciotemporales).
5. Psicológicos (Estrategias de intervención, dirección de la atención y música).

Teniendo en cuenta que todos los récords desde los 5km hasta la maratón han sido batidos desde la aparición de la placa de fibra de carbono (Muñiz-Pardos et al., 2021) y que el resto de factores propuestos se han mantenido estables en los últimos 20 años: condiciones externas, ambientales, calidad de los atletas, drafting o táctica durante la competición (Muñiz-Pardos et al., 2021; Rodrigo-Carranza et al., 2021), cabe destacar

que los nuevos modelos de zapatillas son la principal diferencia para haber batido los récords de los últimos años.

Sun y colaboradores (2020) afirman que a través de la modificación de los materiales del calzado deportivo se pueden obtener mejoras en el rendimiento y en las lesiones. Aumentar la rigidez de la flexión del antepié en el rango óptimo parece beneficiar diferentes variables relacionadas con el rendimiento. Además, las medias suelas más gruesas resultan ser un elemento fundamental para conseguir un mayor efecto de amortiguación, reactividad y disminuir el impacto sobre las articulaciones.

El calzado presenta una gran influencia sobre el patrón de pisada y el rendimiento. Según Franz y colaboradores (2012), por cada 100gr de peso en cada pie se observa un deterioro del 1% en la economía de carrera, aumentando el consumo del VO_2 . El aumento de la rigidez en la suela de la zapatilla, provocado por la inserción de una placa de fibra de carbono en la media suela del calzado, mejora significativamente la economía de carrera, observándose un beneficio del 1% en el ahorro de energía a velocidades submáximas (Roy & Stefanyshyn, 2006). La tecnología utilizada está orientada a modificar el material que forma la media suela, cambiando así sus propiedades biomecánicas y respuestas frente a distintos estímulos con el objetivo de proporcionar beneficios fisiológicos y perceptuales a los atletas (Carreño & Carcuro, 2012; Farina et al., 2019).

El calzado con una adecuada combinación de rigidez y curvatura de la placa permite reducir la pérdida de energía, habitualmente asociada a la fatiga. A efectos prácticos, supone una reducción en los niveles de fatiga, siendo este el atributo más importante de la nueva tecnología utilizada en el calzado deportivo. (Farina et al., 2019).

Nigg y colaboradores (2021) destacan el efecto que provoca la placa de fibra de carbono sobre la mecánica de carrera, denominándolo “el efecto balancín”. Durante la segunda

mitad del contacto con el suelo, el punto de aplicación de la fuerza de reacción sobre el suelo se desplaza hacia delante, provocando que la fuerza de reacción ejercida sobre el talón se manifieste en dirección ascendente perpendicular, coincidiendo con la fase de despegue. Para mejorar al máximo el rendimiento con la placa se requieren tres características: La rigidez de la placa debe provocar que la fuerza de reacción se desplace hacia delante, el punto de pivote no debe ubicarse demasiado en la parte anterior para permitir el efecto balancín y la curvatura de la suela debe ser sustancial pero tampoco demasiado extrema.

Esta tecnología ha demostrado disminuir el gasto energético durante la carrera en esfuerzos continuos a una misma intensidad absoluta del ejercicio, siendo esta mejora de un 4% aproximadamente, en comparación con zapatillas tradicionales sin PFC (Barnes & Kilding, 2019; Hoogkamer et al., 2018; Hunter et al., 2019). Guinness y colaboradores (2020) observaron en 578 corredores de élite que al cambiar a zapatillas con placa de fibra de carbono se produjo una mejora del 1.5-2.9% (de 2 a 4 min) en el 75% de los hombres y del 0.8-2.4% (de 1 a 4 min) en el 71% de las mujeres durante una maratón. Además, esta tecnología de calzado ha demostrado mejorar el rendimiento en maratón entre un 3% y un 4% en aquellos corredores que cambian a zapatillas con PFC, como reflejan los datos públicos de la aplicación Strava (Muñiz-Pardos et al., 2021) .

En la actualidad y especialmente a partir del año 2020, numerosas marcas han incorporado esta tecnología a sus zapatillas (Muñiz-Pardos et al., 2021) , siendo Nike y Adidas las zapatillas propuestas como las mejores en cuanto a sus beneficios sobre el rendimiento, dado que todos los récords hasta el día de hoy, tanto en mujeres como en hombres, han sido batidos con una de estas dos marcas.

Distancia	Marca	Atleta	Fecha	Zapatillas
Hombres				
<i>5km</i>	12:49	Berihu Aregawi	31/12/2021	Nike zoomX Vaporfly Next%2
<i>5000m (Pista)</i>	12:35:36	Joshua Cheptegei	14/08/2020	Nike ZoomX Dragonfly
<i>10km</i>	26:24	Rhonex Kipruto	12/01/2020	Adidas Adizero Takumi Sen 5
<i>10km (Pista)</i>	26:11	Joshua Cheptegei	07/10/2020	Nike ZoomX Dragonfly
<i>½ Maratón</i>	57:31	Jacob Kiplimo	21/11/2021	Nike zoomX Vaporfly Next%2
<i>1hora</i>	21.330m	Mohamed Farah	04/09/2020	Nike ZoomX Dragonfly
<i>Maratón</i>	2:01:39	Eliud Kipchoge	16/09/2018	Nike Zoom Vaporfly 4%
Mujeres				
<i>5km</i>	14:44	Sifan Hassan	17/02/2019	Nike zoomX Vaporfly Next%
<i>5000m (Pista)</i>	14:06:62	Letesenbet Gidey	07/10/2020	Nike ZoomX Dragonfly
<i>10km (Mx)</i>	29:43	Joyciline Jepkosgei	09/09/2017	Adidas Adizero Takumi Sen 5
<i>½ Maratón Mx</i>	1:02:52	Letesenbet Gidey	24/10/2021	Nike zoomX Vaporfly Next%2
<i>½ Maratón W</i>	1:05:16	Peres Jepchirchir	17/10/2020	Adidas Adizero Adios Pro
<i>1hora</i>	18.930m	Sifan Hassan	04/09/2020	Nike ZoomX Dragonfly
<i>Maratón Mx</i>	2:14:04	Brigid Kosgei	13/10/2019	Nike ZoomX Vaporfly Next%
<i>Maratón W</i>	2:17:01	Mary Keitany	23/04/2017	Adidas Adizero Takumi Sen 5

Tabla 2.1 Récords mundiales desde 5km hasta maratón

Datos actualizados de Muñiz-Pardos et al. (2021) con la base de datos de World Athletics (2022).

Una de las principales fórmulas de marketing es la vinculación de nuevos modelos de calzado con resultados deportivos remarcables, especialmente en carreras de maratón. Debido al gran impacto de la maratón, Nike y Adidas han desarrollado y siguen desarrollando ambiciosos proyectos que tienen como meta completar la maratón en menos de dos horas (Justo, 2018).

3. Hipótesis

Las zapatillas de carrera con placa de fibra de carbono mejorarán la economía de carrera, el estrés fisiológico y la percepción subjetiva de esfuerzo durante un ejercicio continuo submáximo.

4. Objetivo

El objetivo de este estudio es examinar el impacto de la tecnología de la placa de fibra de carbono en el calzado sobre los índices de rendimiento, con especial atención a la economía de la carrera, la percepción subjetiva del esfuerzo y las variables fisiológicas en corredores altamente entrenados.

5. Material y métodos

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se engloba dentro de un proyecto de investigación de mayor envergadura que compara 3 modelos de calzado con placa de fibra de carbono y un modelo control sin placa de fibra de carbono.

Este proyecto de mayor magnitud ha sido realizado con un total de 36 participantes, 18 hombres y 18 mujeres, siendo todos ellos corredores altamente entrenados. No obstante, el presente trabajo TFG únicamente se centra en la muestra en la que he podido participar de forma activa, siendo esta una submuestra del proyecto formada por 10 participantes.

El presente proyecto está aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la Comunidad Autónoma de Aragón (CEICA), bajo el número de referencia PI22/305 (véase Anexo 10.1).

5.1 Características de la muestra

La muestra de este estudio está formada por 10 participantes, 5 hombres y 5 mujeres. Los criterios de inclusión iniciales del proyecto requerían que los atletas tuvieran marcas inferiores a 35 minutos en hombres y 40 minutos en mujeres en 10k. Los atletas también debían cumplir los siguientes requisitos: estar sanos, realizar pruebas de medio fondo o fondo, no estar bajo efectos de medicación y no estar sufriendo ningún tipo de lesión.

5.2 Condiciones de calzado

Adidas Adizero Adios 6 (Calzado control)

La condición 1 de calzado es una zapatilla con un peso de 231g, diseñada para corredores con una pisada neutra y destinada a ser utilizada en asfalto. Su suela presenta un drop de 8mm (27mm en el talón y 19mm en el antepié).



Figura 5.1 Calzado control

El modelo de zapatillas Adios 6 ha demostrado resultados muy favorables, incluyendo el récord del mundo de maratón en Berlín de Haile Gebrselassie.

Adidas Adizero Adios Pro 2 (Calzado con placa de fibra de carbono)

La condición 2 de calzado es una zapatilla con un peso de 213g, diseñada para corredores con una pisada neutra y destinada a ser utilizada en asfalto. Su suela presenta un drop de 8,5mm (39mm en el talón y 31,5mm en el antepié).



Figura 5.2 Calzado con PFC

La diferencia más significativa entre ambos modelos es la utilización de la placa de fibra de carbono en la suela en el modelo Adidas Adizero Adios Pro 2.

En la imagen 5.3 se puede observar la distribución de la placa gracias a una toma radiográfica: una placa uniforme en el talón y cinco varillas de carbono que se extienden hacia el antepié, simulando la estructura ósea del pie (Burgess, 2020).



Figura 5.3 Distribución de la PFC en Adidas Pro 2

5.3 Diseño experimental

En el estudio se evaluó a 10 corredores entrenados, 5 hombres y 5 mujeres, en el laboratorio del grupo de investigación GENUUD de la Universidad de Zaragoza y en la pista de atletismo del SAD (ubicada en el centro de la Universidad de Zaragoza, Campus San Francisco). El estudio se dividió en dos visitas diferentes, la primera en el laboratorio y la segunda en la pista de atletismo, con una semana de diferencia entre ambas. El proceso de reclutamiento se realizó a través de entrenadores profesionales que trabajan con grupos de atletas con buen nivel deportivo.

Durante la primera visita, realizada en el laboratorio, se llevó a cabo una prueba de consumo máximo de oxígeno ($VO_{2m\acute{a}x}$) en tapiz rodante y la determinación del umbral anaeróbico (UAN). Durante la segunda visita, se llevó a cabo la prueba realizada en la pista de atletismo, donde se evaluó la economía de carrera con cada modelo de zapatilla

5.3.1 Visita 1 - Prueba de consumo máximo de oxígeno y umbral ventilatorio

Durante la primera visita, en primer lugar, se realizó a todos los participantes un test de antígenos y una vez testado el resultado negativo, firmaron el consentimiento informado (véase Anexo 10.2), y completaron el historial médico-deportivo. Las evaluaciones de laboratorio realizadas el primer día incluyeron la recopilación de datos antropométricos (peso, altura, altura sentado y longitud del pie) y datos de composición corporal medidos con TANITA.

Todos los participantes estuvieron previamente familiarizados con el protocolo de prueba de $VO_{2m\acute{a}x}$. Los sujetos fueron sometidos a un electrocardiograma basal y a una prueba de esfuerzo en rampa hasta el agotamiento para la determinación del $VO_{2m\acute{a}x}$ y el Umbral Anaeróbico. La velocidad individual para la prueba de la segunda visita se estableció al

95% del Umbral Anaeróbico, determinado visualmente y acordado por 2 fisiólogos del ejercicio expertos.

Los sujetos calentaron durante 10 minutos y comenzaron la prueba a 10 km/h y 1% de pendiente, durante 3 minutos, seguido de un incremento de 1km/h cada minuto hasta el agotamiento. La prueba se realizó con el calzado de entrenamiento favorito del atleta, sin placa de fibra de carbono, y sirvió para medir objetivamente la velocidad de carrera individualizada para el test de economía de carrera de la segunda visita, evitando el impacto del componente lento del consumo de oxígeno dado el diseño repetitivo de onda cuadrada de las pruebas de economía de carrera. Al finalizar la prueba de esfuerzo, cada participante realizó la familiarización con las diferentes zapatillas, realizando un trote de 3-4 minutos con cada zapatilla.

5.3.2 Visita 2 - Pruebas de economía de carrera

Durante la segunda visita, se evaluaron los índices de rendimiento con especial énfasis en la economía de carrera para cada condición de calzado, en la pista de cemento de 468 metros contigua a la pista de atletismo del SAD (Universidad de Zaragoza). Para cada prueba se registró al inicio y al final de la sesión: la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad.

Las condiciones del calzado se asignaron aleatoriamente. Cada corredor calentó durante 7 minutos, a un ritmo inferior que el marcado para la prueba, y posteriormente se le equipó un dispositivo portátil para medir el consumo de oxígeno (COSMED K5). Tras un descanso completo, el tiempo necesario para recuperar el estado estable basal, cada atleta realizó 1 serie de 6 minutos al 95% de su Umbral Anaeróbico con cada condición de calzado, con 10 minutos de descanso entre series, asegurando el descanso completo. Para garantizar el ritmo exacto, cada corredor debió correr tras un investigador, que marcaba

el ritmo exacto con la bicicleta. El esquema del test de economía de carrera aparece visualmente descrito en la Figura 5.4.

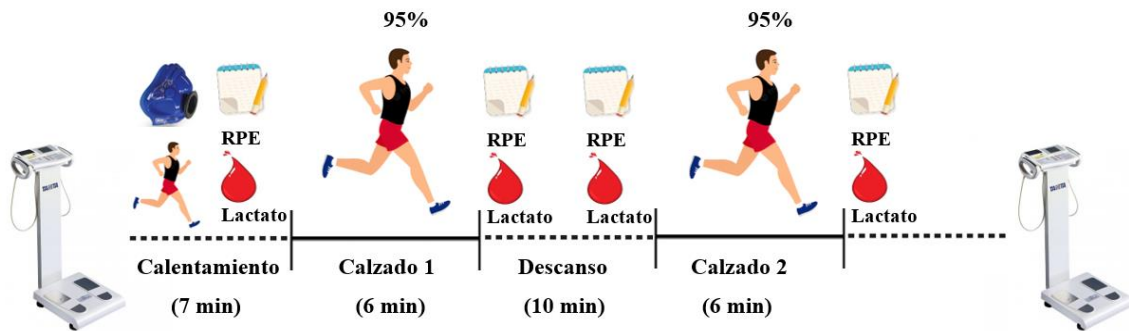


Figura 5.4 Descripción gráfica del esquema seguido para realizar el test de economía de carrera

Durante el test, se midieron los siguientes parámetros:

- Lactato Sanguíneo: Antes de la prueba y 1 minuto después de cada serie de carrera, se tomó una gota de sangre del dedo del corredor para medir el lactato sanguíneo, utilizando el dispositivo Lactate Pro 2.
- Frecuencia cardíaca: Monitorizada durante todo el test con una banda de frecuencia cardíaca (Polar H9).
- Consumo de oxígeno: Monitorizado durante cada serie de 6 minutos con un dispositivo portátil (COSMED K5).
- Percepción de esfuerzo general y de tren inferior: Tomando como referencia la escala Borg 0-10 puntos (véase Anexo 10.5), se evaluó la percepción subjetiva de esfuerzo, general y del tren inferior, antes y después de cada serie de 6 minutos.
- Biomecánica del pie: Se registraron tiempos de contacto y cadencia del pie en la fase de apoyo utilizando un sensor isoinercial (Physilog, GaitUp, Suiza).

5.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó a través del programa Jamovi. El primer paso fue aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk, para conocer si las variables presentaban una distribución normal.

Mediante el siguiente paso se conoció si existen diferencias significativas entre los 2 grupos:

- Para las variables que no presentaban una distribución normal se llevó a cabo un test no paramétrico: Test de Mann-Whitney.
- Para las variables que presentaban una distribución normal se realizó un test paramétrico: Prueba T de Student.

Los valores utilizados para el análisis estadístico fueron: los datos obtenidos en la primera visita y la media de cada factor analizado en la segunda visita, para la recopilación de los datos se utilizaron dos instrumentos de recogida de datos (véase Anexo 10.3 y Anexo 10.4).

Para la obtención de la media de los factores analizados en la segunda visita se utilizaron los valores comprendidos entre el minuto 3 y el minuto 5 en cada serie de 6 minutos. Los valores ventilatorios fueron suavizados realizando la media de 7 respiraciones.

6. Resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos tras realizar el test de normalidad de Shapiro-Wilk. Las variables donde $p > 0,05$ tienen una distribución normal y las variables donde $p < 0,05$ poseen una distribución no normal, dependiendo la distribución de la variable se aplicó la prueba T de Student o el test Mann-Whitney.

Variables	Calzado	Media + SD	p
<i>Consumo de oxígeno</i>	Control	50.89 ± 7.44	0.743
	PFC	50.01 ± 7.16	0.944
<i>Frecuencia cardíaca</i>	Control	158.98 ± 8.48	0.628
	PFC	158.05 ± 9.18	0.271
<i>Cociente respiratorio</i>	Control	1.02 ± 0.13	0.499
	PFC	1.02 ± 0.13	0.164
<i>Lactato</i>	Control	2.38 ± 1.83	<0.001
	PFC	2.33 ± 1.92	<0.001
<i>RPE – General</i>	Control	3.20 ± 2.10	0.004
	PFC	3.00 ± 1.41	0.003
<i>RPE - Piernas</i>	Control	3.40 ± 2.01	0.004
	PFC	2.90 ± 1.45	<0.001
<i>Tiempo de contacto</i>	Control	211.96 ± 21.9	0.296
	PFC	211.55 ± 22.6	0.532
<i>Cadencia</i>	Control	180.55 ± 6.76	0.808
	PFC	180.20 ± 6.61	0.684

Tabla 6.1 Resultados del test de normalidad Shapiro-Wilk

Las variables consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca, cociente respiratorio, tiempo de contacto y cadencia presentaron una distribución normal ($p > 0,005$), mientras que las variables lactato, RPE-General y RPE-Piernas presentaron una distribución no normal ($p < 0,005$).

6.1 Características de la muestra

En la siguiente tabla se recogen las características de los participantes del estudio, reflejando la media de los 10 sujetos y las desviaciones estándar para cada valor. Además de los datos antropométricos, se recogen datos como el volumen de entrenamiento semanal, el consumo máximo de oxígeno y la velocidad del test de economía de carrera.

Variables	Hombres	Mujeres
<i>N</i>	5	5
<i>Edad</i>	26.4 ± 4.56	28.8 ± 9.78
<i>Altura (cm)</i>	178 ± 6.26	162 ± 3.99
<i>Altura sentado (cm)</i>	132 ± 3.44	124 ± 2.3
<i>Peso (kg)</i>	64.7 ± 7.16	53 ± 4.68
<i>Volumen (km/semana)</i>	112 ± 42.1	76 ± 25.1
<i>VO₂máx (ml/kg/min)</i>	75.4 ± 3.99	63.4 ± 3.78
<i>Velocidad del test al 95%</i>	17.1 ± 1.21	14.2 ± 0.83
<i>Umbral anaeróbico (km/h)</i>		

Tabla 6.2 Características de la muestra

La muestra estuvo formada por corredores de fondo, medio fondo y triatletas; dentro de los cuales hubo atletas familiarizados previamente con placa de fibra de carbono y atletas sin familiarizar.

Tipo de atleta		
Fondo	Medio fondo	Triatleta
7	1	2

Tabla 6.3 Tipo de atleta

Atletas familiarizados con PFC	
Si	No
7	3

Tabla 6.4 Atletas familiarizados con PFC

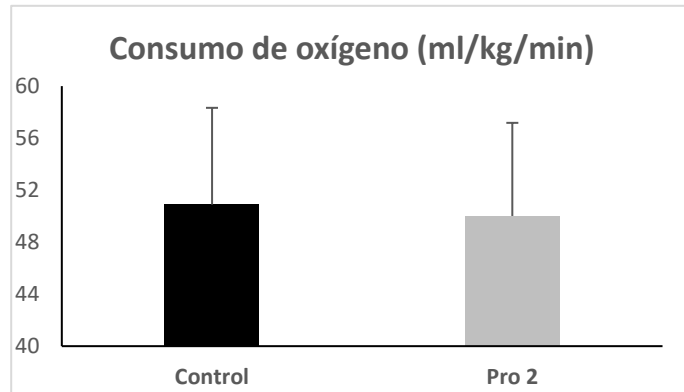
6.2 Economía de carrera

Análisis de la muestra completa

Variables	Consumo de oxígeno	Frecuencia cardíaca	Cociente respiratorio
Adios 6 (Control)	50.89	158.98	1.02
Pro 2 (PFC)	50.01	158.05	1.02
<i>p</i>	0.79	0.82	0.98

Tabla 6.5 Análisis de las variables de economía de carrera

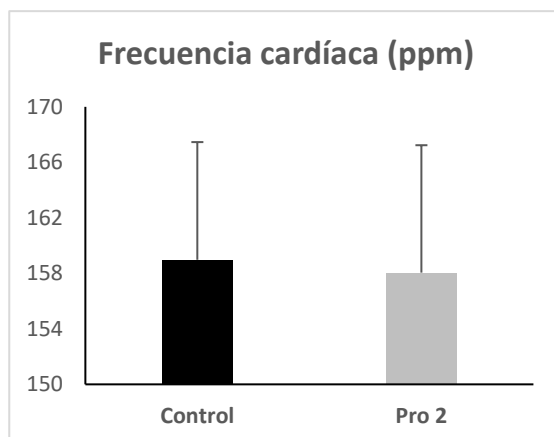
Los atletas presentaron valores muy similares con ambas condiciones de calzado para las 3 variables analizadas: consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca y cociente respiratorio.



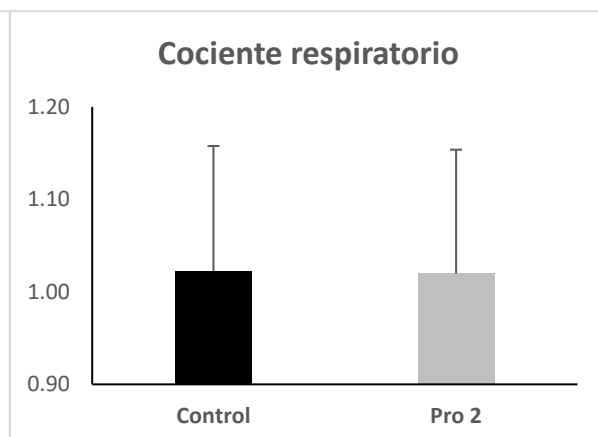
Gráfica 6.1 Consumo de oxígeno

El calzado control reflejó un consumo de oxígeno de 50,89ml/kg/min y una frecuencia cardíaca de 159 mientras que en la zapatilla con PFC los valores obtenidos fueron 50,01ml/kg/min en el consumo de oxígeno y 158 pulsaciones en la frecuencia cardíaca.

Por otro lado, el cociente respiratorio presentó el mismo valor en la zapatilla control y en el modelo con placa de fibra de carbono. En todas las variables analizadas, el análisis estadístico demostró que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$).



Gráfica 6.2 Frecuencia cardíaca



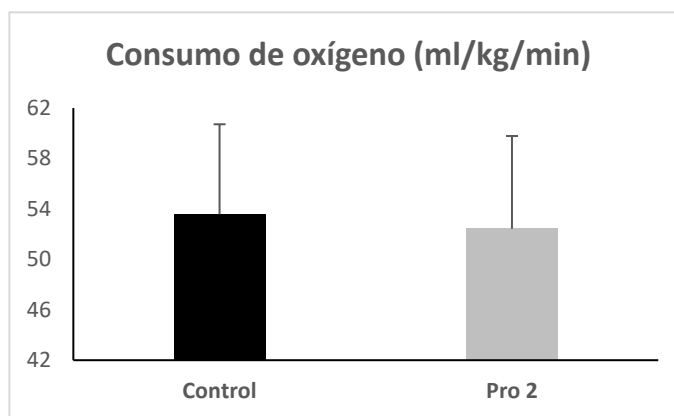
Gráfica 6.3 Cociente respiratorio

Análisis de los atletas familiarizados con PFC

Variabes	Consumo de oxígeno	Frecuencia cardíaca	Cociente respiratorio
Adios 6 (Control)	53.57	159.22	0.98
Pro 2 (PFC)	52.42	158.91	0.99
<i>p</i>	0.77	0.95	0.89

Tabla 6.6 Análisis de las variables de economía de carrera en atletas familiarizados con PFC

Los atletas familiarizados obtuvieron valores similares en las tres variables analizadas en comparación con los valores obtenidos de la muestra completa.

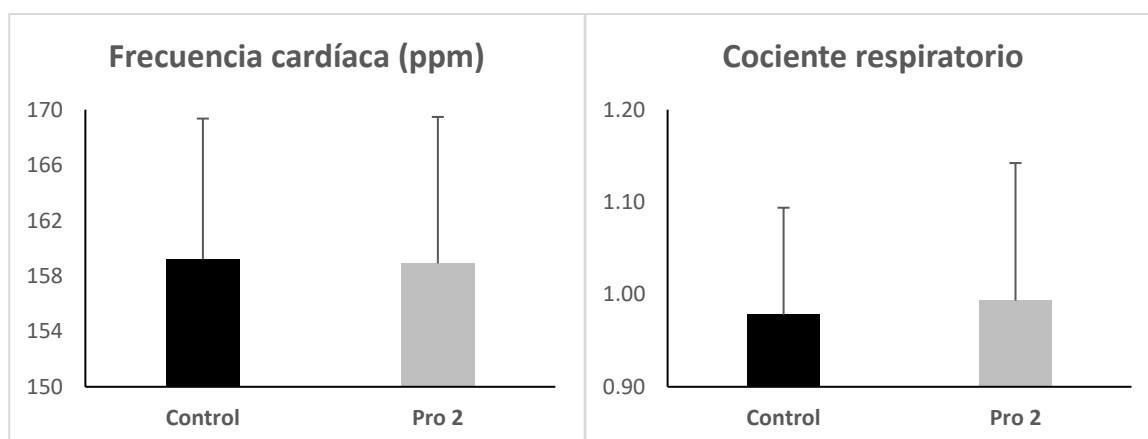


Gráfica 6.4 Consumo de oxígeno en atletas familiarizados

El consumo de oxígeno obtenido

fue 53,57ml/kg/min, la frecuencia cardíaca 159 pulsaciones y el cociente respiratorio 0,98 con el calzado control, frente a 52,42ml/kg/min de consumo de oxígeno, 159 pulsaciones de frecuencia cardíaca y 0,99 de cociente respiratorio con el modelo con placa de fibra de carbono.

El análisis estadístico determinó que no existen diferencias significativas entre las variables analizadas ($p > 0,05$).



Gráfica 6.5 Frecuencia cardíaca en atletas familiarizados

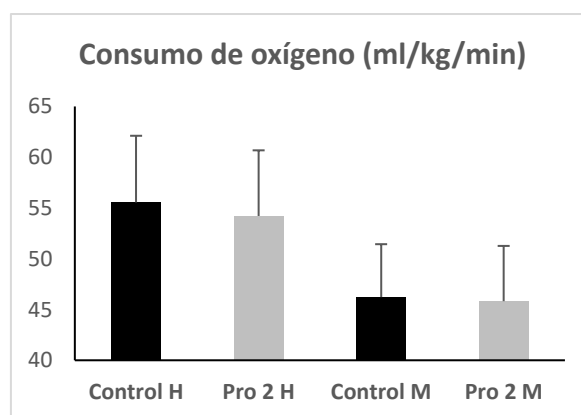
Gráfica 6.6 Cociente respiratorio en atletas familiarizados

Análisis estratificado por sexo

Variables	Consumo de oxígeno	Frecuencia cardíaca	Cociente respiratorio
Hombres			
<i>Adios 6 (Control)</i>	55.55	158.54	0.98
<i>Pro 2 (PFC)</i>	54.21	158.43	1
<i>p</i>	0.75	0.98	0.92
Mujeres			
<i>Adios 6 (Control)</i>	46.22	159.41	1.06
<i>Pro 2 (PFC)</i>	45.82	157.67	1.04
<i>p</i>	0.98	0.58	0.88

Tabla 6.7 Análisis de las variables de economía de carrera estratificado por sexo

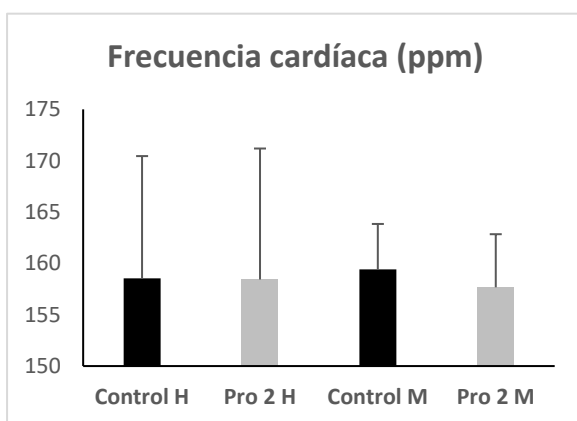
Los hombres presentaron valores casi idénticos para las variables analizadas, en ambas condiciones de calzado el consumo de oxígeno estuvo próximo a 55ml/kg/min, la frecuencia cardíaca fue de 158 pulsaciones y las cifras del



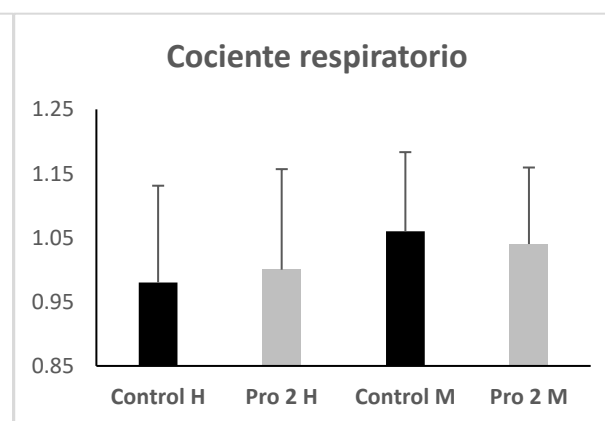
Gráfica 6.7 Consumo de oxígeno por sexo

cociente respiratorio fueron entre 0,98 y 1. Las mujeres siguieron la misma línea que los hombres, manteniendo resultados similares con ambas zapatillas: el consumo de oxígeno fue muy cercano a 46ml/kg/min, la frecuencia cardíaca en torno a 158 pulsaciones y el cociente respiratorio entre 1,04 y 1.06.

No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en los datos analizados.



Gráfica 6.8 Frecuencia cardíaca por sexo



Gráfica 6.9 Cociente respiratorio por sexo

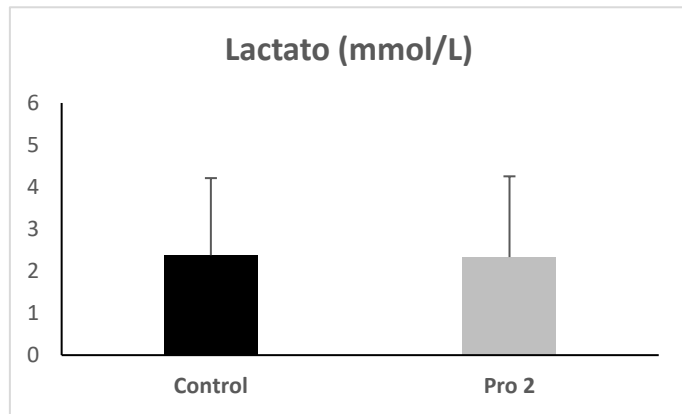
6.3 Respuesta metabólica y perceptual

Análisis de la muestra completa

Variables	Lactato	RPE – General	RPE – Piernas
Adios 6 (Control)	2.38	3.20	3.40
Pro 2 (PFC)	2.33	3	2.90
<i>p</i>	0.38	1	0.4

Tabla 6.8 Análisis de las variables de respuesta metabólica y perceptual

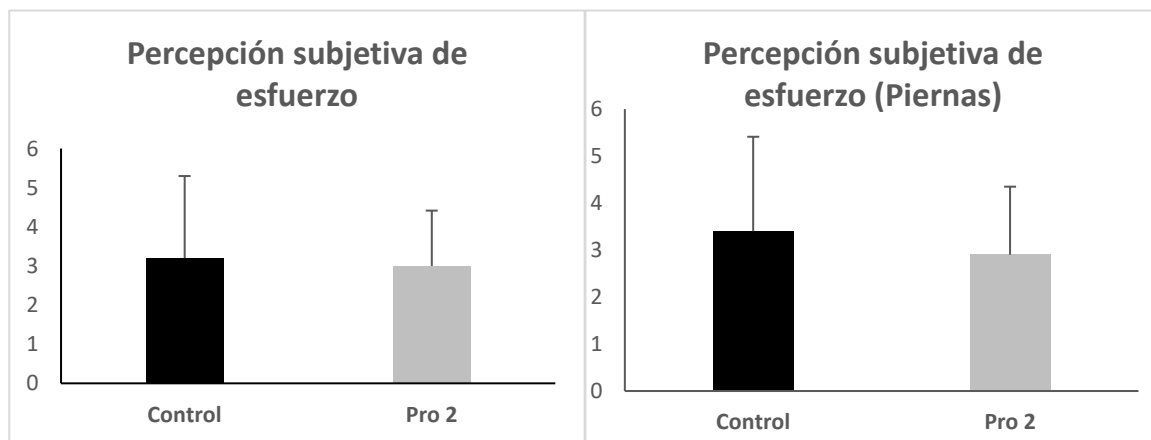
Los atletas presentaron valores de lactato muy parecidos, 2,38mmol/L con el calzado control frente a los 2,33mmol/L obtenidos en las zapatillas con placa.



Gráfica 6.10 Lactato

La percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) presentó cifras similares para el esfuerzo general y el esfuerzo específico en las piernas. Siendo 3,20 y 3,40 los valores expresados por los atletas con el calzado control y con el modelo con placa de fibra de carbono mostraron 3 y 2,90.

En todas las variables analizadas, el análisis estadístico demostró que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$).



Gráfica 6.11 RPE General

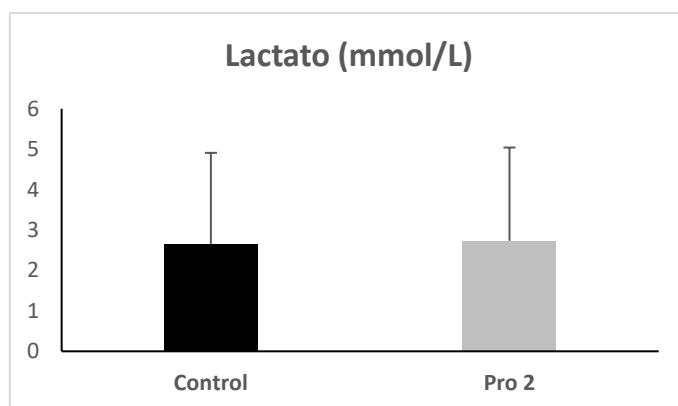
Gráfica 6.12 RPE Piernas

Análisis de los atletas familiarizados con PFC

Variables	Lactato	RPE – General	RPE – Piernas
Adios 6 (Control)	2.65	2.71	3
Pro 2 (PFC)	2.73	2.71	2.71
<i>p</i>	0.75	0.82	0.63

Tabla 6.9 Análisis de las variables de respuesta metabólica y perceptual en atletas familiarizados con PFC

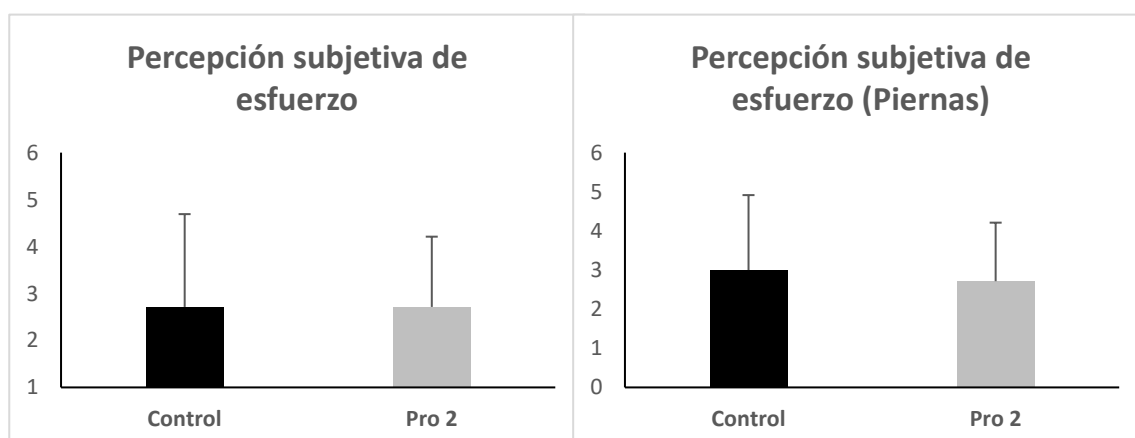
Los atletas familiarizados obtuvieron valores casi idénticos en el lactato, mostrando 2,65mmol/L con el uso del modelo Adios 6 y 2,76mmol/L con el modelo Pro 2.



Gráfica 6.13 Lactato en atletas familiarizados

Los valores de la percepción subjetiva de esfuerzo general y de piernas fueron iguales o inferiores a 3, obteniendo el mismo valor (2,71) de esfuerzo general con ambas condiciones de calzado y valores muy próximos en el esfuerzo percibido en las piernas: 3 con el modelo control y 2,71 con la placa de fibra de carbono.

El análisis estadístico determinó que no existen diferencias significativas entre las variables analizadas ($p > 0,05$).



Gráfica 6.14 RPE General en atletas familiarizados

Gráfica 6.15 RPE Piernas en atletas familiarizados

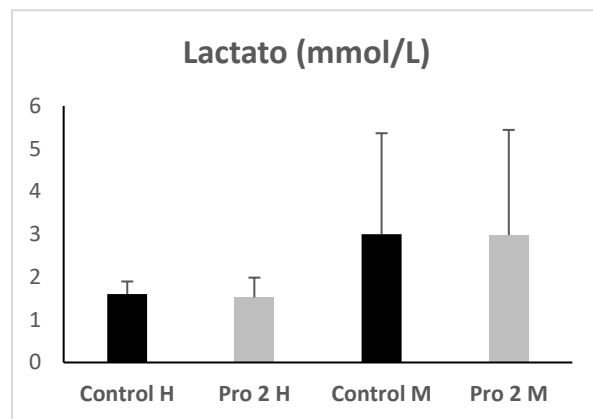
Análisis estratificado por sexo

Variables	Lactato	RPE – General	RPE – Piernas
Hombres			
<i>Adios 6 (Control)</i>	1.60	2.20	2.60
<i>Pro 2 (PFC)</i>	1.52	2.20	2.20
<i>p</i>	0.88	1	0.27
Mujeres			
<i>Adios 6 (Control)</i>	3	4.20	4.20
<i>Pro 2 (PFC)</i>	2.98	3.80	3.60
<i>p</i>	0.99	0.78	0.69

Tabla 6.10 Análisis de las variables de respuesta metabólica y perceptual estratificado por sexo

Los resultados obtenidos mostraron que tanto los hombres como las mujeres mantienen estables sus valores para las variables analizadas.

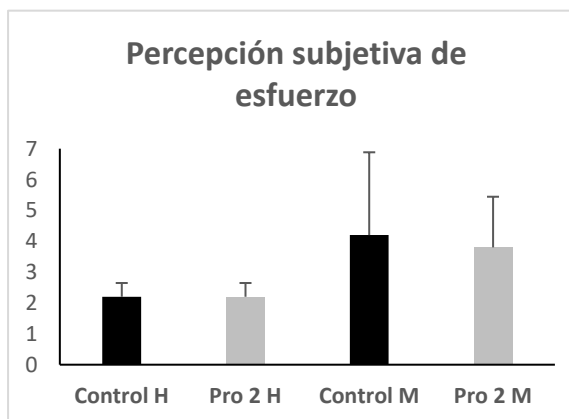
El lactato mostrado fue entre 1,5 y 1,6mmol/L para los hombres y entre



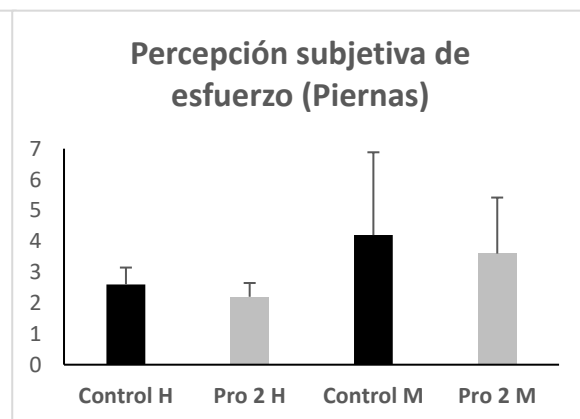
Gráfica 6.16 Lactato por sexo

2,98 y 3 para las mujeres. Los hombres mostraron la misma percepción general (2,20) y muy similar en piernas (2,60 y 2,20), mientras que los valores de las mujeres fueron 4,20 y 3,80 en la percepción general y 4,20 y 3,60 para la percepción de piernas.

No fue posible encontrar diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las diferentes variables analizadas.



Gráfica 6.17 RPE General por sexo



Gráfica 6.18 RPE Piernas por sexo

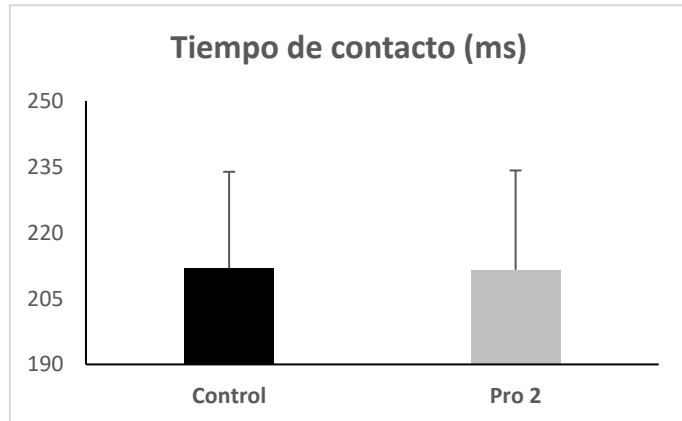
6.4 Biomecánica

Análisis de la muestra completa

Variables	Tiempo de contacto	Cadencia
Adios 6 (Control)	211.96	180.55
Pro 2 (PFC)	211.55	180.20
<i>p</i>	0.97	0.91

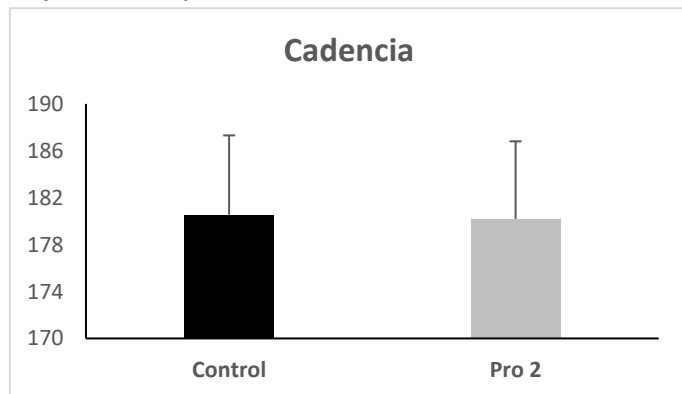
Tabla 6.11 Análisis de las variables biomecánicas

El tiempo de contacto con el calzado control fue de 211,96 frente a 211,55, tiempo obtenido con la zapatilla con placa de fibra de carbono, reflejando así valores muy similares.



Gráfica 6.19 Tiempo de contacto

La cadencia reflejada con el calzado Adios 6 fue de 180,55, mientras que el valor obtenido para la zapatilla Pro 2 fue de 180,20.



Gráfica 6.20 Cadencia

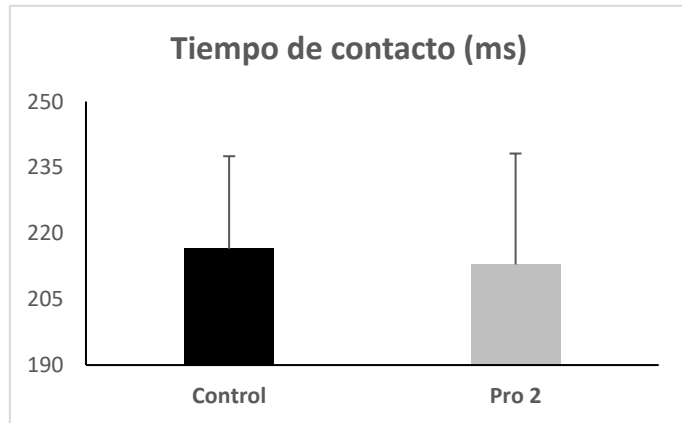
El análisis estadístico sobre ambas variables reflejó que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$).

Análisis de los atletas familiarizados con PFC

Variables	Tiempo de contacto	Cadencia
Adios 6 (Control)	216.45	179.32
Pro 2 (PFC)	212.90	179.57
<i>p</i>	0.80	0.93

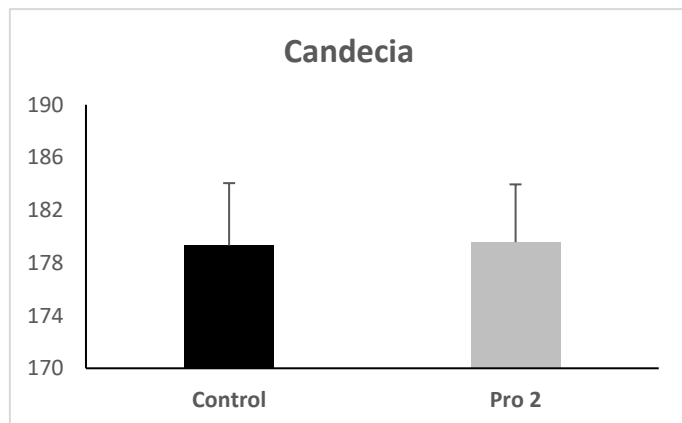
Tabla 6.12 Análisis de las variables biomecánicas en atletas familiarizados con PFC

En los atletas familiarizados, el tiempo de contacto fue de 216,45 en el modelo control, mientras que para el calzado con placa de fibra de carbono se obtuvo el valor de 212,90.



Gráfica 6.21 Tiempo de contacto en atletas familiarizados

La cadencia en la primera condición de calzado fue de 179,32, frente a los 179,57 obtenidos en la zapatilla con PFC. En ambas variables se observaron valores parecidos para las 2 condiciones de calzado.



Gráfica 6.22 Cadencia en atletas familiarizados

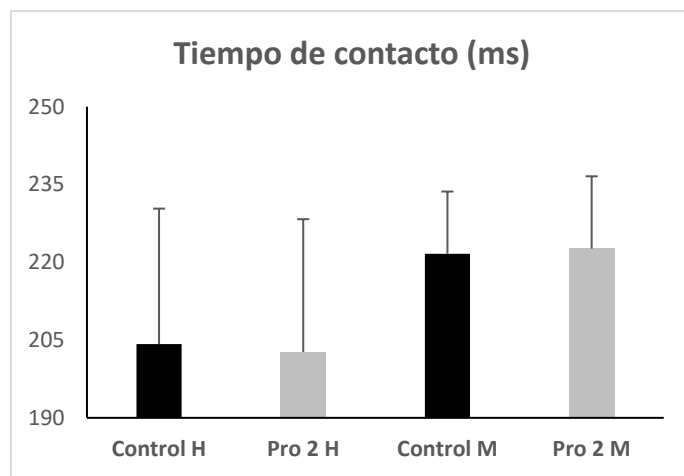
El análisis estadístico determinó que no existen diferencias significativas entre las variables analizadas ($p > 0,05$).

Análisis estratificado por sexo

Variables	Tiempo de contacto	Cadencia
Hombres		
<i>Adios 6 (Control)</i>	204.21	178.16
<i>Pro 2 (PFC)</i>	202.69	177.77
<i>p</i>	0.93	0.93
Mujeres		
<i>Adios 6 (Control)</i>	221.64	183.55
<i>Pro 2 (PFC)</i>	222.63	183.24
<i>p</i>	0.92	0.95

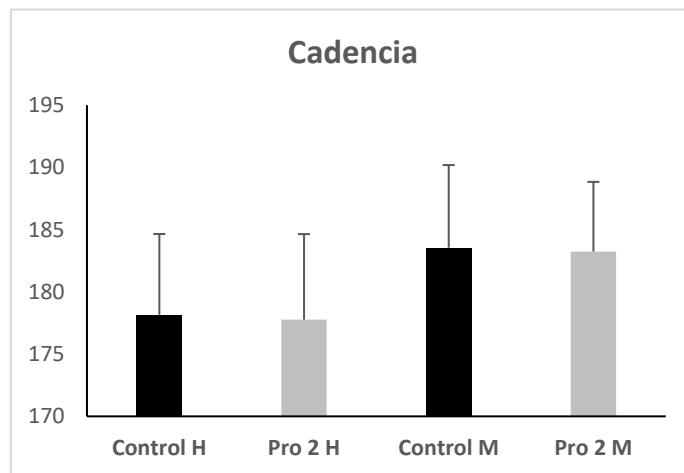
Tabla 6.13 Análisis de las variables biomecánicas estratificado por sexo

El tiempo de contacto mostrado en ambas condiciones (modelo control y modelo con PFC) se mantuvo estable para ambos sexos, siendo muy cercano a 203ms para hombres y 222ms para mujeres.



Gráfica 6.23 Tiempo de contacto por sexo

Los datos reflejan que la cadencia obtenida por los hombres (178) y por las mujeres (183) no varió entre utilizar las zapatillas Adios 6 y Pro 2.



Gráfica 6.24 Cadencia por sexo

Tras realizar el análisis estadístico, los datos reflejaron

que no se existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ambas condiciones de calzado.

7. Discusión

El objetivo del estudio era examinar el impacto de la tecnología de la placa de fibra de carbono en el calzado sobre los índices de rendimiento, con especial atención a la economía de la carrera, la percepción subjetiva del esfuerzo y las variables fisiológicas en corredores entrenados.

Los estudios realizados en los últimos años presentan mejoras con la placa de fibra de carbono: disminución del gasto energético durante la carrera en esfuerzos a una misma intensidad absoluta, mejorando en un 4% aproximadamente (Barnes & Kilding, 2019; Hoogkamer et al., 2018; Hunter et al., 2019); el cambio a zapatillas con placa de fibra de carbono mejoró las marcas un 1,5-2,9% en hombres y un 0,8-2,4% en mujeres durante la maratón (Guinness et al., 2020); y la mejora en el rendimiento entre un 3% y un 4% en maratón para los deportistas que pasan a utilizar zapatillas con placa de fibra de carbono (Muñiz-Pardos et al., 2021). En base a estos estudios, la mejora esperada de la economía de carrera era entre un 1% y un 4%.

El análisis de la muestra completa, de los atletas familiarizados con PFC y de los atletas según su sexo indica que no es posible afirmar que existan diferencias significativas entre la economía de carrera con el calzado control y las zapatillas con placa de fibra de carbono, en la muestra incluida en el presente estudio ($p>0,05$).

Los valores obtenidos fueron muy similares entre el modelo control y la zapatilla con placa de fibra de carbono en los parámetros analizados: Economía de carrera, respuesta metabólica y perceptual y biomecánica. Debido a este motivo es necesario plantear los posibles motivos que han dado lugar a no encontrar las mejoras descritas en los estudios anteriormente citados.

La velocidad determinada para realizar el test de economía de carrera fue $17,21 \pm 1,21$ km/h para los hombres y $14,2 \pm 0,83$ km/h, siendo el 95% del umbral anaeróbico de los deportistas. Estas velocidades son próximas a las determinadas por Joubert y Jones (2021), que observaron una mejora con diferentes zapatillas con PFC, estableciendo una mejora del 3% a 14 km/h y del 2,6% a 20 km/h en economía de carrera. Day y Hahn (2020) encontraron resultados similares, observando que los deportistas obtenían una mejora en la economía de carrera a 17 km/h utilizando un calzado con mayor rigidez. Sin embargo, los atletas resultaron ser más económicos con el calzado menos rígido en velocidades inferiores, 14 km/h. Day y Hahn (2020) demostraron que el beneficio de la zapatilla con placa de fibra de carbono es dependiente de la velocidad de carrera, considerando que la muestra del presente estudio es de muy alto nivel, coincidiendo los valores de VO_2 máx para hombres y mujeres con los hallados en estudios realizados con atletas de élite (Barnes & Kilding, 2019; Hoogkamer et al., 2018), es necesario plantear que mayores velocidades de carrera podrían haber resultado en un beneficio mayor.

Por otro lado, los valores de cociente respiratorio fueron iguales o ligeramente inferiores a 1. Es necesario destacar que los valores de cociente respiratorio por encima de 1 indican la presencia de algún grado de metabolismo anaeróbico (Allison & Burdiat, 2010), podemos afirmar que la intensidad seleccionada para realizar el test de economía de carrera fue inferior al umbral anaeróbico.

Teniendo en cuenta lo anteriormente discutido, es posible que sean otros factores los que puedan justificar que el presente estudio no haya revelado un efecto positivo de la zapatilla con PFC, como son: la gran variabilidad interindividual entre sujetos, la selección del calzado adecuado para los deportistas seleccionados, la falta de familiarización con la nueva tecnología de PFC o la limitada muestra del estudio.

Hunter y colaboradores (2019) observaron una gran variabilidad interindividual entre sujetos a la hora de mejorar su economía de carrera, comparando diferentes modelos con PFC. Los resultados mostraron que no todos los participantes obtuvieron el mismo porcentaje de mejora, algunos corredores mejoraron su economía de carrera un 6% mientras que otros no mejoraron nada; un 0%. Estos autores, atribuyeron estas diferencias a las alteraciones en la técnica de carrera y la posible variabilidad en la adaptación al calzado. Debido a la gran variabilidad entre sujetos, resulta todavía más necesario utilizar una gran muestra de sujetos que permita que los datos obtenidos en el estudio sean extrapolables al resto de corredores.

A pesar de que las afirmaciones de Carreño & Carcuro (2012) señalan que la tecnología utilizada está orientada a modificar el material que forma la media suela, cambiando así sus propiedades biomecánicas y respuestas frente a distintos estímulos; no fue posible encontrar diferencias significativas ($p > 0,05$) en las variables analizadas: tiempo de contacto y cadencia. Esto puede ser debido a que los modelos de zapatillas que no soportan la trayectoria de movimiento preferida del corredor pueden ser dañinas para el sistema locomotor y pueden causar potencialmente una mayor demanda de energía/actividad muscular y un mayor riesgo de lesiones. También se debe tener en cuenta que la trayectoria de movimiento preferida de un corredor puede que no sea constante, depende de factores como la fatiga, el estado de entrenamiento y la presencia de lesiones (Hoitz et al., 2020). Resulta necesario y recomendable la adaptación progresiva al calzado deportivo, las adaptaciones tecnológicas que se realizan en las zapatillas pueden influir de manera positiva en el rendimiento, pero también puede afectar en la biomecánica de la carrera (Sun et al., 2020).

Es necesario considerar la posibilidad de que el calzado con PFC seleccionado para realizar el estudio puede no ser el óptimo para mejorar la economía de carrera en relación con los participantes de este TFG. Sería interesante en futuros estudios que se tuviese en cuenta estos factores, para ello se podría realizar un análisis más profundo de la biomecánica de los atletas durante la carrera, analizando otras variables como el ángulo de pisada del pie, ángulo de pronación/supinación, etc..., con el objetivo de conocer si el calzado propuesto para un estudio puede ser interesante para mejorar su rendimiento, descartando así a los participantes que no cumplan las condiciones necesarias.

Además de los factores señalados, es necesario destacar que el modelo control seleccionado, Adidas Adizero Adios 6, es una zapatilla diseñada para la competición a ritmos rápidos y presenta una buena reactividad. Aunque carezca de PFC cuenta con una media suela con la tecnología LightStrike PRO de Adidas, un material diseñado para la absorción y el despedido de energía (Sánchez, 2022). Es posible que la comparación realizada con otro modelo de tan alto nivel haya enmascarado una mejora de economía de carrera, en relación con la zapatilla habitual del atleta.

Entre las principales fortalezas del estudio, se encuentran la calidad deportiva de la muestra, y la novedad del mismo; es el primero, hasta la fecha, que ha evaluado el efecto de una zapatilla con PFC en un entorno real, fuera de laboratorio (Pista de cemento). La principal limitación encontrada en el estudio es el tamaño de la muestra, siendo 10 el número de participantes, 5 por sexo. No obstante, el nivel de los corredores es muy alto incluyendo campeones nacionales, campeones de Europa y atletas olímpicos. La importancia y la dificultad para disponer de atletas de élite en situaciones de investigación fue explicada por Legaz-Arrese (2012) estableciendo varios factores claves:

- La generalización de los resultados y conclusiones de las investigaciones debe basarse en una amplia muestra de sujetos.
- En el ámbito del alto rendimiento deportivo, la propia concepción de lo que es un deportista de élite implica que el número de sujetos posibles para la investigación sea insuficiente.

En base a las anteriores reflexiones, resulta interesante proponer otros estudios que continúen profundizando en la temática, modificando factores que pueden ser claves a la hora de encontrar diferencias significativas:

- Comparar las mismas condiciones de calzado, pero reclutando exclusivamente atletas familiarizados, durante un periodo extenso de tiempo, con la placa de fibra de carbono y que sean capaces de correr a velocidades elevadas durante un tiempo prolongado.
- Comparar las mismas variables introduciendo una nueva condición de calzado, la zapatilla habitual de competición del atleta. De esta manera, podríamos tener un modelo de referencia al cual el deportista ya está acostumbrado. Así, se podría comprobar si no existe mejora con el modelo con placa de fibra de carbono, o solo es falta de familiarización con esta nueva tecnología.

8. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado una comparación de la economía de carrera entre dos condiciones de calzado: un modelo control y un modelo con placa de fibra de carbono. Todos los participantes han sido corredores altamente entrenados.

Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en las distintas variables seleccionadas entre las dos condiciones de calzado: consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca, cociente respiratorio, lactato, percepción subjetiva de esfuerzo general y de piernas, tiempo de contacto y cadencia.

Existen diferentes motivos como la familiarización con la placa de fibra de carbono o la gran variabilidad interindividual y limitaciones como el tamaño de la muestra que han podido dar lugar a que los resultados de este estudio no coincidan con las afirmaciones de los estudios citados anteriormente, donde la placa de fibra de carbono ayuda a mejorar la economía de carrera de un 1% a un 4%.

Estos hallazgos permiten la posibilidad de plantear otros estudios donde la muestra seleccionada sean solo atletas familiarizados con calzado con placa de fibra de carbono y sean capaces de correr a elevadas velocidades, debido a un alto consumo de oxígeno, un buen umbral anaeróbico y una excelente economía de carrera. De esta manera, los datos obtenidos pueden ser de gran interés para los atletas de alto nivel y sus entrenadores, ya que los atletas estarían reproduciendo un entorno más similar a lo que ocurre en competición.

9. Bibliografía

- Allison, D. T., & Burdiat, G. (2010). Pruebas de esfuerzo cardiopulmonar en la práctica clínica. *Revista Uruguaya de Cardiología*, 25, 17–27.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2019). A Randomized Crossover Study Investigating the Running Economy of Highly-Trained Male and Female Distance Runners in Marathon Racing Shoes versus Track Spikes. *Sports Medicine*, 49(2), 331–342. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-1012-3>
- Bermon, S., Garrandes, F., Szabo, A., Berkovics, I., & Adami, P. E. (2021). Effect of Advanced Shoe Technology on the Evolution of Road Race Times in Male and Female Elite Runners. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3(April), 1–6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.653173>
- Burgess, M. (2020). The science behind Adidas's new world-record running shoe. Extraído el 15 de Junio de 2022 de: [The science behind Adidas's new world-record running shoe | WIRED UK](#)
- Carreño, F., & Carcuro, G. (2012). Corredores: Bases científicas para la elección de calzado y prevención de lesiones. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 23(3), 332–336. [https://doi.org/10.1016/s0716-8640\(12\)70318-8](https://doi.org/10.1016/s0716-8640(12)70318-8)
- Day, E., & Hahn, M. (2020). Optimal footwear longitudinal bending stiffness to improve running economy is speed dependent. *Footwear Science*, 12(1), 3–13. <https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1696897>
- Farina, E. M., Haigh, D., & Luo, G. (2019). Creating footwear for performance running. *Footwear Science*, 11(sup1), S134–S135. <https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1606119>

- Franz, J. R., Wierzbinski, C. M., & Kram, R. (2012). Metabolic cost of running barefoot versus shod: Is lighter better? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(8), 1519–1525. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182514a88>
- García, G. A., & Ladino, Y. (2008). Desarrollo de competencias científicas a través de una estrategia de enseñanza y aprendizaje por investigación. *Studiositas*, 3(3), 7–16.
- Guinness, J., Bhattacharya, D., Chen, J., Chen, M., & Loh, A. (2020). An Observational Study of the Effect of Nike Vaporfly Shoes on Marathon Performance. 1–14. <http://arxiv.org/abs/2002.06105>
- Hoitz, F., Vienneau, J., & Benno M., N. (2020). Influencia de las Zapatillas para Correr sobre la Actividad Muscular. *Revista de Entrenamiento Deportivo*, 1(3), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239852>
- Hoogkamer, W., Kipp, S., Frank, J. H., Farina, E. M., Luo, G., & Kram, R. (2018). A Comparison of the Energetic Cost of Running in Marathon Racing Shoes. *Sports Medicine*, 48(4), 1009–1019. <https://doi.org/10.1007/S40279-017-0811-2>
- Hunter, I., McLeod, A., Valentine, D., Low, T., Ward, J., & Hager, R. (2019). Running economy, mechanics, and marathon racing shoes. *Journal of Sports Sciences*, 37(20), 2367–2373. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1633837>
- Infante-Ojeda, Á., Flores-Labrada, Y., & Fuentes-Varona, D. (2017). Los fundamentos técnicos de las carreras de fondo y medio fondo (revisión). *Revista de La Facultad de Cultura Física de La Universidad de Granma*, 14(42), 109–118.

- Joubert, D. P., & Jones, G. P. (2021). A comparison of running economy across seven highly cushioned racing shoes with carbon-fibre plates. Faculty Publications, 33. <https://doi.org/10.1080/19424280.2022.2038691>
- Joyner, M. J. (1991). Modeling: Optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *Journal of Applied Physiology*, 70(2), 683–687. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.70.2.683>
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions. *Journal of Physiology*, 586(1), 35–44. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>
- Joyner, M. J., Hunter, S. K., Lucia, A., & Jones, A. M. (2020). Physiology and fast marathons. *Journal of Applied Physiology*, 128(4), 1065–1068. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00793.2019>
- Justo, A. (2018). Influencia del calzado con tecnología “energy return” en la economía de carrera y el rendimiento. 1–31.
- Legaz-Arrese, A. (2012). Manual de entrenamiento deportivo. *Paidotribo*.
- Muñiz-Pardos, B., Sutehall, S., Angeloudis, K., Guppy, F. M., Bosch, A., & Pitsiladis, Y. (2021). Recent Improvements in Marathon Run Times Are Likely Technological, Not Physiological. *Sports Medicine*, 51(3), 371–378. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01420-7>
- Navarro, F. (2020). Prohibidas las zapatillas con las que Eliud Kipchoge batió su histórico récord en la maratón. Extraído el 15 de Junio de 2022 de: https://www.lespanol.com/deportes/otros-deportes/20200131/prohibidas-zapatillas-kipchoge-batio-historico-record-maratoniano/463954539_0.html

- Nigg, B. M., Cigoja, S., & Nigg, S. R. (2021). Teeter-totter effect: A new mechanism to understand shoe-related improvements in long-distance running. *British Journal of Sports Medicine*, 55(9), 462–463. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102550>
- Ogueta-Alday, A., & García-López, J. (2016). Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo. *RICYDE: Revista Internacional de Ciencias Del Deporte*, 12(45), 278–308. <https://doi.org/10.5232/ricyde>
- Pozuelos Estrada, F. J., & Travé González, G. (2004). Aprender investigando, investigar para aprender: el punto de vista de los futuros docentes. In *Investigación en la escuela* (Issue 54, pp. 5–26). <http://dx.doi.org/10.12795/IE.2004.i54.01>
- Rodrigo-Carranza, V., González-Mohíno, F., Santos del Cerro, J., Santos-Concejero, J., & González-Ravé, J. M. (2021). Influence of advanced shoe technology on the top 100 annual performances in men's marathon from 2015 to 2019. *Scientific Reports*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01807-0>
- Roy, J. P. R., & 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. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000193562.22001.e8>
- Sánchez, M. (2022). Adidas Adizero Adios 6, las zapatillas para romper tu récord. Extraído el 19 de junio de 2022 de: <https://www.deportesevolution.com/adidas-adizero-adios-6-zapatillas-romper-record/>
- Sun, X., Lam, W. K., Zhang, X., Wang, J., & Fu, W. (2020). Systematic review of the role of footwear constructions in running biomechanics: Implications for running-

related injury and performance. In *Journal of Sports Science and Medicine* (Vol. 19, Issue 1, pp. 20–37).

World Athletics. (2022). *World Records*. Extraído el 29 de mayo de 2022 de:
<https://worldathletics.org/records/by-category/world-records>

10. Anexos

10.1 Resolución favorable CEICA



Informe Dictamen Favorable

C.P. - C.I. PI22/305
15 de junio de 2022

Dña. María González Hinjos, Secretaria del CEIC Aragón (CEICA)

CERTIFICA

1º. Que el CEIC Aragón (CEICA) en su reunión del día 15/06/2022, Acta Nº 12/2022 ha evaluado la propuesta del investigador referida al estudio:

Título: Impacto de la tecnología de zapatillas con placa de fibra de carbono sobre índices de rendimiento en corredores entrenados.

Investigador Principal: José Antonio Casajús Mallén, Universidad de Zaragoza

Versión protocolo: v2, 10/06/2022

Versión documento de información y consentimiento: v2, 10/06/2022

2º. Considera que

- El proyecto se plantea siguiendo los requisitos de la Ley 14/2007, de investigación biomédica y su realización es pertinente.
- Se cumplen los requisitos necesarios de idoneidad del protocolo en relación con los objetivos del estudio y están justificados los riesgos y molestias previsibles para el sujeto.
- Es adecuada la utilización de los datos y los documentos elaborados para la obtención del consentimiento.
- El alcance de las compensaciones económicas previstas no interfiere con el respeto a los postulados éticos.
- La capacidad de los Investigadores y los medios disponibles son apropiados para llevar a cabo el estudio.

3º. Por lo que este CEIC emite **DICTAMEN FAVORABLE a la realización del estudio.**

Lo que firmo en Zaragoza
GONZALEZ
HINJOS MARIA
- DNI
03857456B
Firmado digitalmente
por GONZALEZ
HINJOS MARIA - DNI
03857456B
Fecha: 2022.06.17
12:53:04 +02'00'
María González Hinjos
Secretaria del CEIC Aragón (CEICA)

10.2 Consentimiento informado

DOCUMENTO DE INFORMACIÓN Y CONSENTIMIENTO

Título de la investigación: Impacto de la tecnología de zapatillas con placa de fibra de carbono sobre índices de rendimiento en corredores entrenados.	
Investigador principal: Borja Muñiz/Diego Vidal	
Teléfono: 687422752 618545941	Mail: bmuniz@unizar.es diegovidalroldan@gmail.com
Centro: Laboratorio de Valoración Funcional y Composición Coporal – GENUD Lab	

1. Introducción:

Nos dirigimos a usted para solicitar su participación en un proyecto de investigación que estamos realizando en la Universidad de Zaragoza. Su participación es absolutamente voluntaria, en ningún caso debe sentirse obligado a participar, pero es importante para obtener el conocimiento que necesitamos. Antes de tomar una decisión es necesario que:

- lea este documento entero
- entienda la información que contiene el documento
- haga todas las preguntas que considere necesarias
- tome una decisión meditada
- firme el consentimiento informado, si finalmente desea participar.

Si decide participar se le entregará una copia de esta hoja y del documento de consentimiento firmado. Por favor, consérvelo por si lo necesitara en un futuro.

2. ¿Por qué se le pide participar?

Se le solicita su colaboración porque cumple con el requisito de ser un corredor de medio fondo/fondo entrenado. En el estudio se valorará la economía de carrera mediante la

utilización de diferente calzado deportivo, en el que participarán un total de 10 corredores previsiblemente. El calzado deportivo a testar se compone de los siguientes modelos:

- Adidas Adizero Adios Pro 2
- Adidas Adizero Adios 6

3. ¿Cuál es el objeto de este estudio?

Valorar el impacto de la placa de fibra de carbono sobre diferentes indicadores de rendimiento, con especial atención en la economía de carrera, la percepción subjetiva del esfuerzo y la respuesta fisiológica en corredores entrenados.

4. ¿Qué tengo que hacer si decido participar?

La realización del estudio se divide en dos visitas:

- La primera visita, se recopilarán datos antropométricos y de composición corporal (talla, peso, longitud de pie, tanita). Los participantes se someterán posteriormente a una prueba de esfuerzo máxima, supervisada por un médico del deporte. Tras la prueba de esfuerzo, los participantes realizarán la vuelta a la calma trotando 2-3 minutos con cada calzado deportivo, familiarizándose con los modelos de zapatilla mencionados más arriba.
- Durante la segunda visita, cada participante realizará un calentamiento de 7 minutos, y 1 serie de 6 minutos a intensidad submáxima con cada condición de calzado sobre un anillo de cemento de 468m (Pista de Atletismo del SAD, Campus San Francisco, Zaragoza), con 10 minutos de descanso entre ellos. Durante el test se valorarán las medidas fisiológicas necesarias para valorar la economía de carrera. Un investigador servirá de liebre a cada atleta para marcar el ritmo lo más precisamente posible.

5. ¿Qué riesgos o molestias supone?

El presente estudio incluye una prueba de esfuerzo máxima. Existe la posibilidad de que se produzcan ciertos cambios durante la prueba, entre los que se incluyen: alteración de la tensión arterial, desmayos, frecuencia cardíaca irregular, rápida o lenta, apoplejía o muerte. Se harán todos los esfuerzos posibles para minimizar estos riesgos mediante la evaluación de la información preliminar concerniente a su salud y fitness, y mediante las observaciones que se hagan durante la prueba. Se dispone de material de urgencia así, como de personal preparado para actuar en cualquier situación inusual que pueda surgir. La información que usted posea sobre su estado de salud o sobre experiencias previas en las que tuvo sensaciones anormales al realizar un esfuerzo físico, puede afectar a la seguridad o al valor de la prueba de esfuerzo. La rápida comunicación por su parte de las sensaciones que experimenta al realizar esfuerzos durante dicha prueba es también de gran importancia. Usted es responsable de revelar esa información al personal de la prueba cuando se le pregunte.

6. ¿Obtendré algún beneficio por mi participación?

Al tratarse de un estudio de investigación orientado a generar conocimiento no es probable que obtenga ningún beneficio por su participación, si bien usted contribuirá al avance científico y al beneficio social.

Usted no recibirá ninguna compensación económica por su participación. No obstante, si lo desea usted recibirá un informe con los resultados derivados de su prueba.

7. ¿Cómo se van a tratar mis datos personales?

Se anonimizarán los datos, de forma que a cada sujeto se le asociará un código y la base de datos solo será tratada por determinada parte del equipo investigador.

Información básica sobre protección de datos.

Responsable del tratamiento: Borja Muñoz Pardos

Finalidad: Sus datos personales serán tratados exclusivamente para el trabajo de investigación a los que hace referencia este documento.

Legitimación: El tratamiento de los datos de este estudio queda legitimado por su consentimiento a participar.

Destinatarios: No se cederán datos a terceros salvo obligación legal.

Derechos: Podrá ejercer sus derechos de acceso, rectificación, supresión y portabilidad de sus datos, de limitación y oposición a su tratamiento, de conformidad con lo dispuesto en la LO 3/2018 de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales y el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD 2016/679) ante el investigador principal del proyecto, pudiendo obtener información al respecto dirigiendo un correo electrónico a la dirección dpd@salud.aragon.es.

Así mismo, en cumplimiento de lo dispuesto en el RGPD, se informa que, si así lo desea, podrá acudir a la Agencia de Protección de Datos (<https://www.aepd.es>) para presentar una reclamación cuando considere que no se hayan atendido debidamente sus derechos.

El tratamiento de sus datos personales se realizará utilizando técnicas para mantener su anonimato mediante el uso de códigos aleatorios, con el fin de que su identidad personal quede completamente oculta durante el proceso de investigación.

Los resultados del presente trabajo de investigación se podrán utilizar y publicar en congresos o revistas científicas, pero se harán siempre con datos anonimizados y nunca se revelará información personal del participante.

8. ¿Se me informará de los resultados del estudio?

Usted tiene derecho a conocer los resultados del presente estudio, tanto los resultados generales como los derivados de sus datos específicos. También tiene derecho a no conocer dichos resultados si así lo desea. Por este motivo en el documento de consentimiento informado le preguntaremos qué opción prefiere. En caso de que desee conocer los resultados, el investigador le hará llegar los resultados.

En caso de que durante el proyecto de investigación se observe cualquier hallazgo que pueda ser relevante para la salud del participante, nos pondremos en contacto con usted para que pueda acudir a su médico habitual.

¿Puedo cambiar de opinión?

Su participación es totalmente voluntaria, puede decidir no participar o retirarse del estudio en cualquier momento. Basta con que le manifieste su intención al investigador principal del estudio. En caso de que decida retirarse del estudio puede solicitar la destrucción de los datos, muestras u otra información recogida sobre usted.

¿Qué pasa si me surge alguna duda durante mi participación?

En la primera página de este documento está recogido el nombre y el teléfono de contacto del investigador responsable del estudio. Puede dirigirse a él en caso de que le surja cualquier duda sobre su participación. Muchas gracias por su atención, si finalmente desea participar le rogamos que firme el documento de consentimiento que se adjunta y le reiteramos nuestro agradecimiento por contribuir a generar conocimiento científico.

DOCUMENTO DE INFORMACIÓN Y CONSENTIMIENTO

PROYECTO: Impacto de la tecnología de zapatillas con placa de fibra de carbono sobre índices de rendimiento en corredores entrenados.

Yo, (nombre y apellidos del participante)

He leído la hoja de información que se me ha entregado, he podido hacer preguntas sobre el estudio y he recibido suficiente información sobre el mismo.

He hablado con: (nombre del investigador)

Comprendo que mi participación es voluntaria y que puedo retirarme del estudio cuando quiera, sin tener que dar explicaciones y sin que esto repercuta en mis cuidados médicos.

Presto libremente mi consentimiento para participar en este estudio y doy mi consentimiento para el acceso y utilización de mis datos conforme se estipula en la hoja de información que se me ha entregado.

Deseo ser informado sobre los resultados del estudio: sí no

He recibido una copia firmada de este Consentimiento Informado.

Firma del participante/Padre/Madre/Tutor

Fecha:

He explicado la naturaleza y el propósito del estudio al paciente mencionado.

Firma del investigador:

Fecha:

10.3 Instrumento de recogida de datos – Visita 1

Nombre y apellidos:	Fecha:
Edad:	Peso(kg):
Altura(cm):	Altura sentado(cm):
Longitud pie derecho(cm):	Porcentaje graso:
Tipo de atleta:	Familiarización con PFC:
Volumen de entrenamiento (Km/sem):	Entrenamiento con PFC (Km/sem):
Experiencias previas con placa de fibra de carbono:	
Datos obtenidos de la prueba de esfuerzo	
VO₂máx:	Umbral anaeróbico:
Observaciones	

10.4 Instrumento de recogida de datos – Visita 2

Nombre y apellidos:				Fecha:	
Velocidad del test:					
Zapatilla 1:					
Lactato		RPE – General		RPE – Piernas	
Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Zapatilla 2:					
Lactato		RPE – General		RPE – Piernas	
Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Observaciones					
Indicaciones					
<ul style="list-style-type: none"> • El orden de las zapatillas se escoge de manera aleatoria. • La medición de lactato se realiza antes de iniciar la prueba y 1 minuto después de finalizar la serie. • La medición de RPE se realiza antes de iniciar la prueba y en el mismo momento que se finaliza la serie. 					

10.5 Escala de Borg

0	Reposo
1	Muy, muy ligero
2	Muy ligero
3	Ligero
4	Moderado
5	Algo duro
6	Duro
7	Muy duro
8	Muy, muy duro
9	Casi máximo
10	Esfuerzo máximo