

FACULTAD DE EDUCACIÓN Y DEPORTE
Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte
Curso: 2020-2021

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES FISIOLÓGICOS DETERMINANTES
EN EL RENDIMIENTO DEPORTIVO DE CORREDORES DE MARATÓN DE
ÉLITE: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**



AUTOR: LÓPEZ SANTAMARÍA, SERGIO

DIRECTOR: SANTOS CONCEJERO, JORDAN

Fecha, 6 de mayo de 2021

ÍNDICE

<u>RESUMEN</u>	<u>3</u>
<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>5</u>
<u>MÉTODOS.....</u>	<u>14</u>
ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE ESTUDIOS	14
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN	14
NIVEL DE EVIDENCIA Y CALIDAD DE LOS ESTUDIOS.....	18
<u>RESULTADOS</u>	<u>19</u>
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS.....	19
<u>DISCUSIÓN.....</u>	<u>31</u>
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>36</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>38</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PROGRESIÓN DEL TIEMPO DEL RÉCORD DEL MUNDO DE MARATÓN DESDE 1920.5	
FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DEL EJERCICIO (RUNNING SPEED) Y EL CONSUMO DE OXÍGENO EN HOMBRES ENTRENADOS Y NO ENTRENADOS.	8
FIGURA 3. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DEL EJERCICIO (RUNNING SPEED) Y LA ACUMULACIÓN DE LACTATO EN SANGRE.	10
FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DEL UMBRAL DE LACTATO DE UN DEPORTISTA DE RESISTENCIA ALTAMENTE ENTRENADO Y EL DE UN SUJETO NO ENTRENADO.	11
FIGURA 5. INFLUENCIA DEL ENTRENAMIENTO DE RESISTENCIA EN LA MEJORA DEL UMBRAL DE LACTATO.	12
FIGURA 6. EL CONSUMO DE OXÍGENO DE DOS CORREDORES CON VALORES IGUALES DE VO_2 MAX, PERO CON DIFERENTE ECONOMÍA DE CARRERA.	13
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA UTILIZADA PARA LA REVISIÓN SISTEMÁTICA.	17

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO EN CARRERAS DE FONDO.	6
TABLA 2. VALOR DE LA ESCALA DE PEDRO Y NIVEL DE EVIDENCIA DE LOS ESTUDIOS SELECCIONADOS.	18
TABLA 3. TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ESTUDIOS SELECCIONADOS.	20

RESUMEN

El objetivo de esta revisión fue conocer que factores fisiológicos influyen de manera más significativa en el rendimiento de corredores de élite a lo largo de una prueba de maratón. Para ello se realizó una revisión sistemática de los distintos estudios científicos que analizaran los principales factores fisiológicos que influyen en el rendimiento deportivo de los corredores de maratón de élite. Tras realizar la búsqueda en la base de datos PubMed, 6 artículos cumplieron con los criterios de inclusión. Se encontró que el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{ max}}$) es un factor determinante del rendimiento de maratón entre corredores de un nivel heterogéneo. Sin embargo, entre corredores de élite de un nivel similar, este factor pasa a un segundo plano y cobran mayor importancia la capacidad que tiene cada atleta para correr a ritmos elevados manteniendo un estado metabólico lo más estable posible, es decir, utilizando la menor cantidad de energía y de oxígeno posible. Por este motivo, se ha encontrado evidencia científica de que la economía de carrera (RE) puede ser el factor más determinante en el rendimiento en las pruebas de maratón de la actualidad.

Palabras clave: atletismo, fisiología, éxito, corredores africanos, economía de carrera, resistencia.

ABSTRACT

The aim of this review was to identify which physiological factors influence most significantly the performance of elite runners throughout a marathon event. For this purpose, a systematic review of the different scientific studies that analyzed the main physiological factors that influence the athletic performance of elite marathon runners was carried out. After searching the PubMed database, 6 articles met the inclusion criteria. Maximal oxygen uptake ($VO_{2\text{ max}}$) was found to be a determinant of marathon performance among runners of a heterogeneous level. However, among elite runners of a similar level, this factor takes a back seat to the ability of each athlete to run at high paces while maintaining a metabolic state as stable as possible, i. e. using as little energy and oxygen as possible. For this reason, scientific evidence has been found that running economy (RE) may be the most important determinant of performance in today's marathon events.

Key words: athletics, physiology, success, African runners, running economy, endurance, endurance.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la alta demanda física que exige la participación en una carrera de maratón, el interés de la sociedad por esta modalidad ha aumentado significativamente en los últimos años, convirtiéndose así en una de las pruebas de larga distancia con mayor popularidad en la sociedad actual (Lara et al., 2014). Desde el año 1921, la Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo (IAAF) fijó que la distancia oficial de esta prueba sería de 42,195 kilómetros, distancia que se mantiene en las pruebas de maratón de la actualidad (IAAF, 2008).

Dada la gran popularidad de esta prueba de larga distancia, el nivel de los corredores que participa en ella es del todo heterogéneo. Es por ello que encontramos un abanico de participantes muy amplio, que va desde los millones de corredores populares entusiasmados por acabar una maratón a lo largo de sus vidas, hasta los mejores corredores de élite de todo el planeta (Ogueta-Alday & García-López, 2016).

A pesar de la ya mencionada popularidad de la carrera de maratón, lo que realmente ha despertado el interés de la sociedad y de la comunidad científica por este tipo de pruebas ha sido la gran mejora de la marca que han conseguido los corredores de élite en los últimos años (La Torre et al., 2011; Marc et al., 2013; Joyner et al., 2011), especialmente de los corredores keniatas (Tam et al., 2012; Tucker et al., 2015) y etíopes, los cuales han dominado esta modalidad desde el año 1999 (Eichner, 2015).

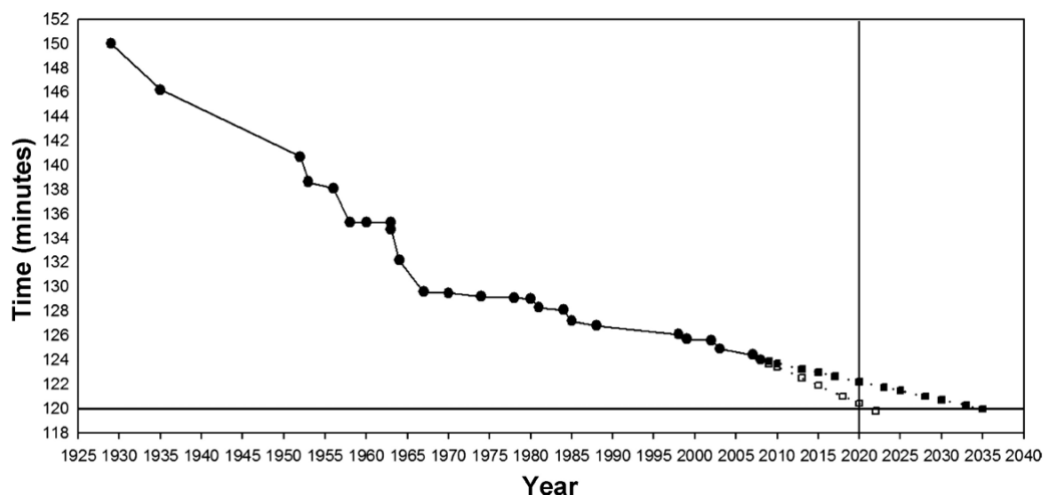


Figura 1. Progresión del tiempo del récord del mundo de maratón desde 1920.

Nota. Recuperado de “The two-hour marathon: who and when?”, de Joyner, M. J., Ruiz, J. R., & Lucia, A., 2011, *Journal of Applied Physiology*, 110, p. 275.

Hoy en día el récord oficial de esta prueba es de 2:01:39 logrado en 2018 por el plusmarquista mundial Eliud Kipchoge en la maratón de Berlín (Hoogkamer et al., 2019). Un año más tarde, en Viena, el mismo Kipchoge asombró al mundo entero logrando derribar la barrera de las 2 horas, estableciendo un nuevo récord mundial de 1:59:40. Sin embargo, esta marca no pasó a ser oficial por causa de todas las ayudas externas que recibió durante la prueba (Hoogkamer et al., 2018).

Esta gran mejora en el rendimiento ha traído consigo un marcado interés por parte de la comunidad científica por conocer y estudiar aquellos factores que influyen de manera significativa en el rendimiento de los corredores de maratón de élite.

Este rendimiento se ve claramente influenciado por una gran variedad de factores (*Tabla 1*), tales como, los factores ambientales (temperatura, humedad, viento, altitud...), los biomecánicos (*leg-stiffness*, patrón de pisada, calzado...), los psicológicos (motivación, foco de atención...), los genéticos (raza, género, tipo de fibras musculares...), aquellos relacionados con el entrenamiento (tipo de periodización, distribución de cargas, estrategias de aclimatación...) y los relativos a la nutrición (ingesta de carbohidratos, hidratación...). Sin embargo, lo cierto es que son los factores fisiológicos los que juegan verdaderamente un papel fundamental en el rendimiento deportivo de los maratonianos de máximo nivel.

Tabla 1. Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo.

1. Ambientales	2. Entrenamiento	3. Fisiológicos	4. Biomecánicos	5. Psicológicos
1.1. Aire/viento	2.1. Resistencia	3.1. VO_{2max}	4.1. Antropometría	5.1. Intervención
1.2. Temperatura	2.2. Fuerza	3.2. Umbral ventilatorio	4.2. Leg-stiffness	5.2. Dirección atención
1.3. Humedad	2.3. Aclimatación calor	3.3. Economía carrera	4.3. Flexibilidad	5.3. Música
1.4. Altitud	2.4. Altura	3.4. Edad	4.4. Patrón de pisada	
1.5. Pendiente terreno		3.5. Género	4.5. Calzado	
		3.6. Fibras musculares	4.6. Ostrésis plantares	
		3.7. Fatiga	4.7. Parámetros e-t	
		3.8. Raza		

Nota. Recuperado de “Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo”, de Ogueta-Alday, A., & García-López, J., 2016, *RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte*, 45(12), p. 279.

Dentro de estos factores fisiológicos, el consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_2 \text{ max}$), el porcentaje de consumo máximo de oxígeno que se puede mantener a lo largo de la prueba ($\% \text{VO}_2 \text{ max}$), el umbral de lactato (*lactate threshold*), la economía de carrera (*running economy*) y la cinética del consumo de oxígeno parecen ser los factores fisiológicos más determinantes a la hora de lograr el máximo rendimiento en una prueba de maratón (Joyner & Coyle, 2008).

Con el fin de conocer de que manera pueden llegar a influir cada uno de estos parámetros en el rendimiento de una prueba de maratón, a continuación, procederemos a analizar de uno en uno cada uno de estos factores fisiológicos.

Consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_2 \text{ max}$)

Se conoce como consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_2 \text{ max}$) o potencia aeróbica a la capacidad máxima que tiene un individuo para producir energía a través de los procesos metabólicos oxidativos. Dicho de otra forma, es la capacidad máxima que tiene un individuo para coger, transportar y utilizar el oxígeno que obtiene del exterior (Warren, 2003). Según Kenney y colaboradores (2015), el $\text{VO}_2 \text{ max}$ se podría considerar como uno de los mejores parámetros de medición de la resistencia cardiorrespiratoria o capacidad aeróbica de un individuo.

En deportistas de resistencia, el valor de $\text{VO}_2 \text{ max}$ ronda los 70-85 ml/kg/min, siendo un 10 % más bajo en mujeres, dada su menor concentración de hemoglobina en sangre y sus mayores niveles de grasa corporal (Saltin & Astrand, 1967; Pollock, 1977; Durstine et al., 1987; Pate et al., 1987; Kenney et al., 2015). Sin embargo, los deportistas de resistencia, tanto hombres como mujeres, presentan valores de $\text{VO}_2 \text{ max}$ bastante superiores que individuos jóvenes y activos de la población general. Esto es precisamente porque el entrenamiento de resistencia regular y bien planificado trae consigo una serie de adaptaciones fisiológicas que se traducen en un aumento de la potencia aeróbica de una persona. Entre estas adaptaciones destacan el aumento del volumen cardiaco sistólico, del volumen sanguíneo, y de la densidad capilar y mitocondrial en los músculos entrenados (Costill et al., 1976).

Este fenómeno se puede observar de manera bastante clara en la *Figura 2*, en la que se compara el consumo de oxígeno de una persona con experiencia en entrenamiento de resistencia y el de una persona no entrenada o sedentaria, a distintas velocidades o intensidades (Kenney et al., 2015). Como se puede observar, el sujeto entrenado tiene un $\text{VO}_2 \text{ max}$ bastante más elevado que el sujeto no entrenado o sedentario, por lo que a la intensidad equivalente al

$\dot{V}O_{2\max}$ de cada sujeto, la persona entrenada, es capaz de correr a una velocidad o intensidad superior.

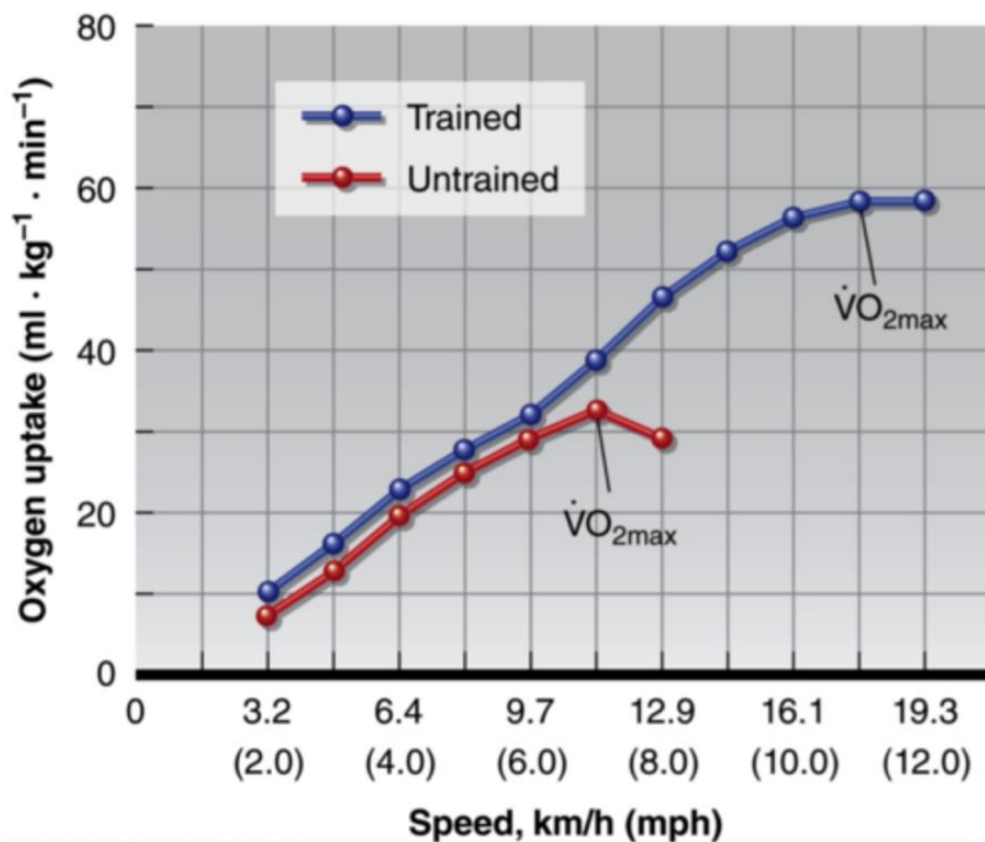


Figura 2. Relación entre la intensidad del ejercicio (running speed) y el consumo de oxígeno en hombres entrenados y no entrenados.

Nota. Recuperado de “Physiology of Sport and Exercise”, de Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L., 1994, *Human kinetics*, Vol. 524, p. 128.

A pesar de la importancia que tiene en el rendimiento el tener un valor de $\dot{V}O_{2\max}$ elevado, se debe tener en cuenta que un sujeto altamente entrenado es capaz de mantener la intensidad equivalente a su $\dot{V}O_{2\max}$ solamente durante 7-10 minutos. Es por ello que en pruebas cuya duración supera los 10-15 minutos, como puede ser el caso de la prueba de maratón, los deportistas llevan una intensidad inferior a su $\dot{V}O_{2\max}$ (Costill et al., 1973; Bassett & Howley, 2000). Es precisamente por este motivo por lo que es importante tener en cuenta que, a pesar de que el $\dot{V}O_{2\max}$ es un buen parámetro para conocer la capacidad aeróbica de una persona, no sería posible predecir quien se proclamaría ganador en una prueba de maratón solamente conociendo el $\dot{V}O_{2\max}$ de cada corredor (Kenney et al., 2015).

Porcentaje de consumo máximo de oxígeno sostenible (% VO_{2 max})

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente sobre el VO_{2 max}, es importante enfatizar que en pruebas como la maratón o de características similares, cobra mayor importancia el porcentaje de VO_{2 max} que el/la deportista es capaz de mantener durante todo el transcurso de la prueba (también conocido como *performance VO_{2 max}*), ya que, en una prueba de una duración superior a las 2 horas, ningún individuo es capaz de mantener una intensidad equivalente a su VO_{2 max} (Kenney et al., 2015).

Sin embargo, los corredores que participan en este tipo de pruebas, desarrollan la capacidad de correr durante un largo periodo de tiempo a un porcentaje muy elevado de su VO_{2 max}. Por ejemplo, un corredor de maratón altamente entrenado seguramente sea capaz de completar los 42 kilómetros de una maratón a una intensidad equivalente al 80-85 % de su VO_{2 max}, y en cambio, a una persona no entrenada o sedentaria le resultará imposible mantener esa intensidad durante ese largo periodo de tiempo. Por este motivo, a pesar de que los corredores de maratón de clase mundial no tengan un valor de VO_{2 max} absoluto exageradamente elevado, tienen muy desarrollada la capacidad de mantener una intensidad bastante alta durante un largo periodo de tiempo (Kenney et al., 2015).

Umbral de lactato o umbral anaeróbico

El umbral de lactato (*lactate threshold*) o umbral anaeróbico es la intensidad en la cual la concentración de lactato en sangre [La⁻] se dispara y comienza a aumentar de una manera exponencial (Matthew et al., 2007). A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, los valores de lactato en sangre aumentan por el simple hecho de que la producción de lactato es mayor que “limpieza” o reutilización del mismo. Por este motivo, el umbral de lactato se podría definir también como la intensidad en la cual la producción de lactato supera la “limpieza” o reutilización del mismo (Kenney et al., 2015).

La *Figura 3* presenta la relación entre la intensidad o velocidad de carrera y la concentración de lactato en sangre. Como se puede observar, a velocidades de carrera bajas, la concentración de lactato en sangre es igual o muy similar a los valores en reposo. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad, llega un punto en el que la concentración de lactato se dispara. Este punto se conoce generalmente como *lactate threshold* (LT) o umbral de lactato (Kenney et al., 2015).

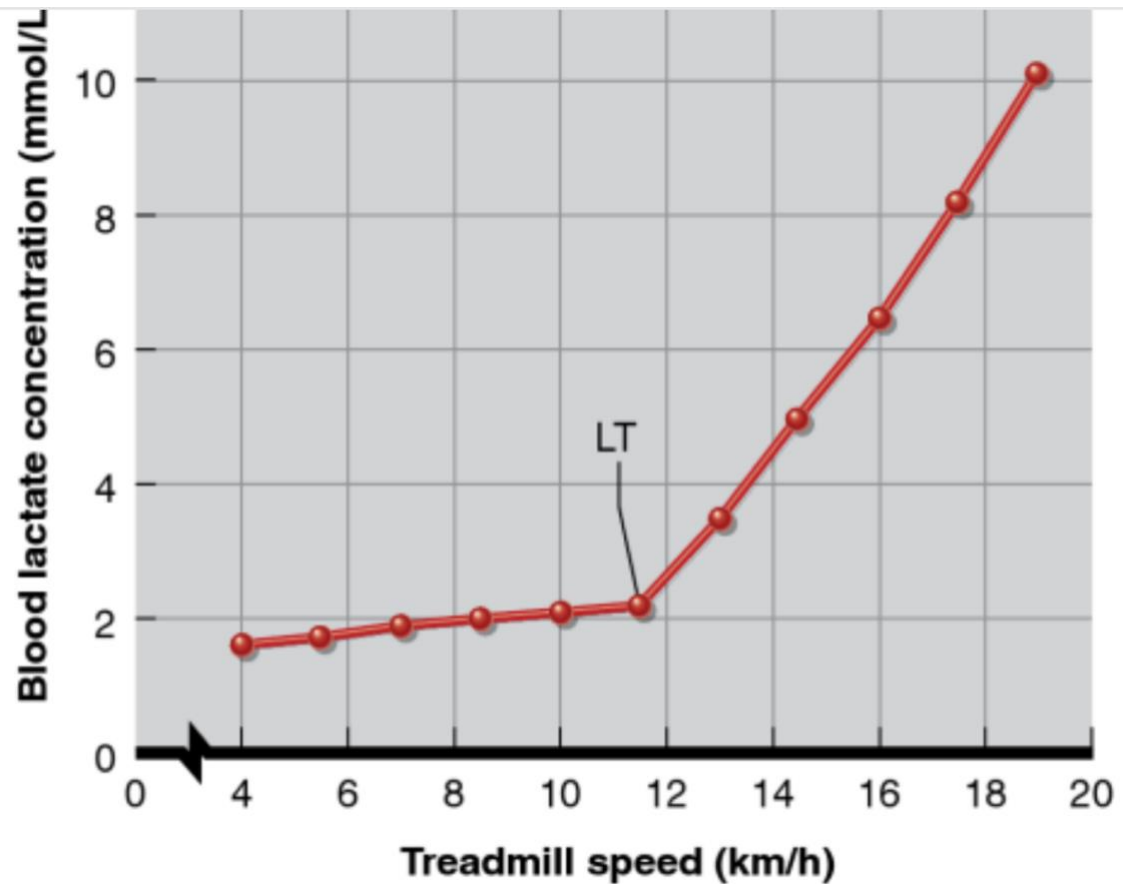


Figura 3. Relación entre la intensidad del ejercicio (running speed) y la acumulación de lactato en sangre.

Nota. Recuperado de “Physiology of Sport and Exercise”, de Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L., 1994, *Human kinetics*, Vol. 524, p. 130.

En sujetos no entrenados, el lactato empieza a acumularse al realizar un esfuerzo físico de una intensidad equivalente al 50-60 % de su $VO_{2\text{ max}}$, en cambio, los deportistas de resistencia altamente entrenados, son capaces de realizar esfuerzos físicos de una intensidad equivalente al 75-90 % de su $VO_{2\text{ max}}$ (el cual ya será superior de por sí) sin tener valores muy altos de lactato en sangre (*Figura 4*). Este fenómeno se traduce en que los deportistas de resistencia tienen la capacidad de ir más veloces a la intensidad equivalente al umbral anaeróbico (Joyner & Coyle, 2008). Por esta razón, dos sujetos con valores de $VO_{2\text{ max}}$ iguales, la persona que tenga el umbral de lactato más alto, tendrá mayor predisposición para exhibir un mayor rendimiento en carreras o pruebas de resistencia (Kenney et al., 2015).

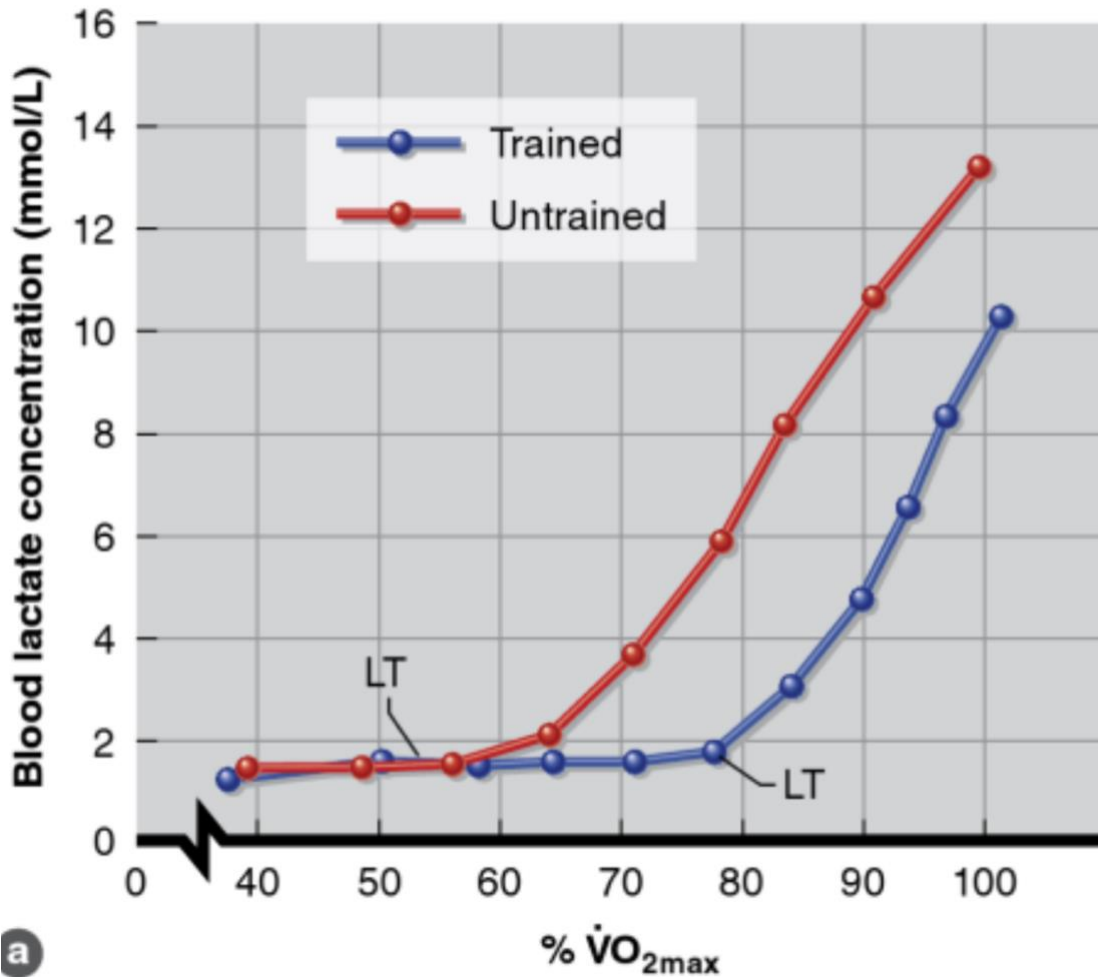
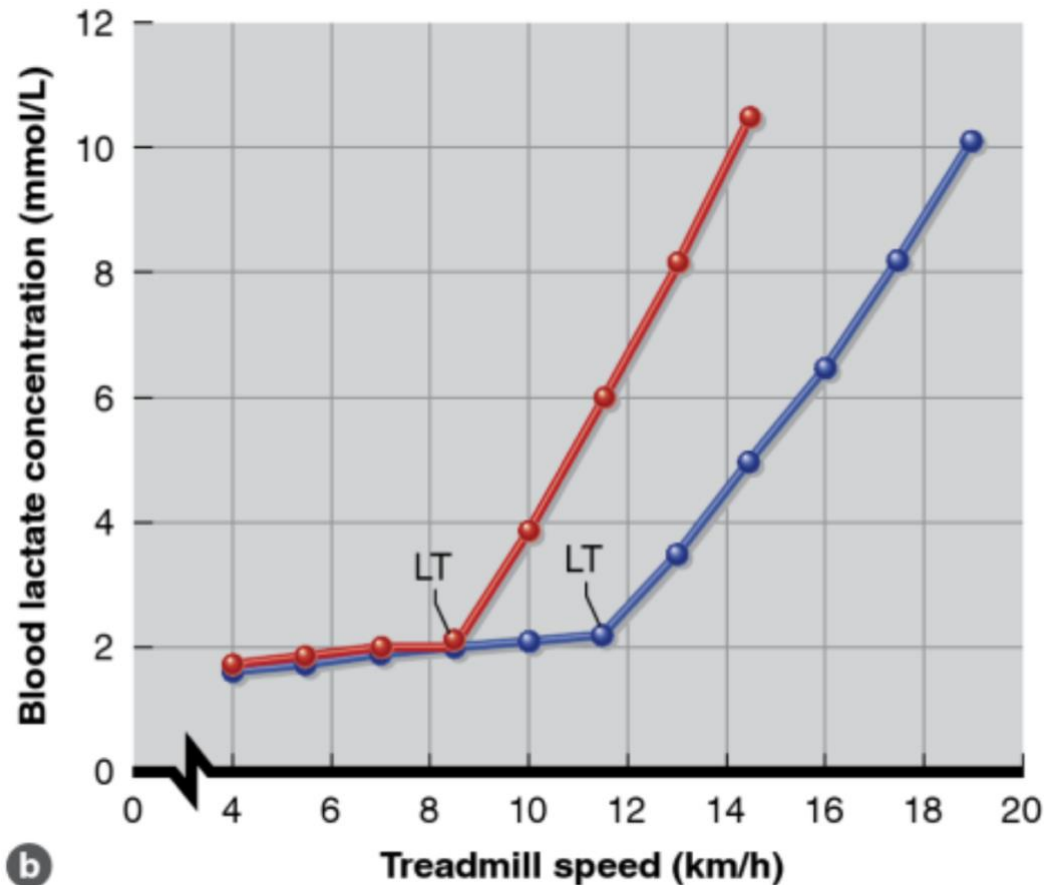


Figura 4. Representación del umbral de lactato de un deportista de resistencia altamente entrenado y el de un sujeto no entrenado.

Nota. Recuperado de "Physiology of Sport and Exercise", de Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L., 1994, *Human kinetics*, Vol. 524, p. 277.

Como se puede observar en la *Figura 5*, con el entrenamiento de resistencia regular y bien planificado, se producen en el organismo ciertas adaptaciones en lo relativo al umbral anaeróbico. Gracias a estas adaptaciones, los atletas serán capaces de correr a mayor velocidad, pero produciendo la misma cantidad de lactato. Esto se traduce en una gran mejora del rendimiento, ya que los deportistas habrán desarrollado la capacidad de conseguir una gran cantidad de energía a través de medios aeróbicos, sin acumular grandes cantidades de lactato en sangre (Kenney et al., 2015).



b *Figura 5. Influencia del entrenamiento de resistencia en la mejora del umbral de lactato.*

Nota. Recuperado de “Physiology of Sport and Exercise”, de Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L., 1994, *Human kinetics*, Vol. 524, p. 277.

Economía de carrera (RE)

La economía de carrera (*running economy*) se podría definir como la demanda energética necesaria para correr a una velocidad submáxima (por debajo del umbral de lactato) concreta. Dicho de otra manera, es la cantidad de energía que un individuo utiliza al correr a una velocidad concreta y en la cual el consumo de oxígeno (VO_2) se mantenga estable (Barnes & Kilding, 2015; Saunders et al., 2004; Conley & Krahenbuhl, 1980; Daniels, 1985; Anderson, 1996; Conley et al., 1984; Morgan & Craib, 1992). La economía de carrera se debe medir siempre a intensidades submáximas, es decir, intensidades por debajo del umbral anaeróbico, ya que una vez pasado dicho umbral, aparece el componente lento de la cinética consumo de oxígeno (*slow component of VO_2 kinetic*) y el consumo de oxígeno no se vuelve a mantener en condiciones estables (Poole et al., 1994).

De este modo, corredores con buena economía de carrera utilizarán menos oxígeno para correr a una velocidad submáxima concreta en comparación con corredores con una economía de carrera más pobre (Thomas et al., 1999). La *Figura 6* recoge los datos de dos corredores (*runner A* y *runner B*) con un consumo máximo de oxígeno muy similar (64-65 ml/kg/min), pero con una economía de carrera completamente distinta. A todas las velocidades superiores a 11.3 km/h, el corredor B consumía bastante menos oxígeno en comparación con el corredor A, es decir, el corredor B era más económico y necesitaba menos oxígeno y energía para mantener una velocidad submáxima concreta (Kenney et al., 2015).

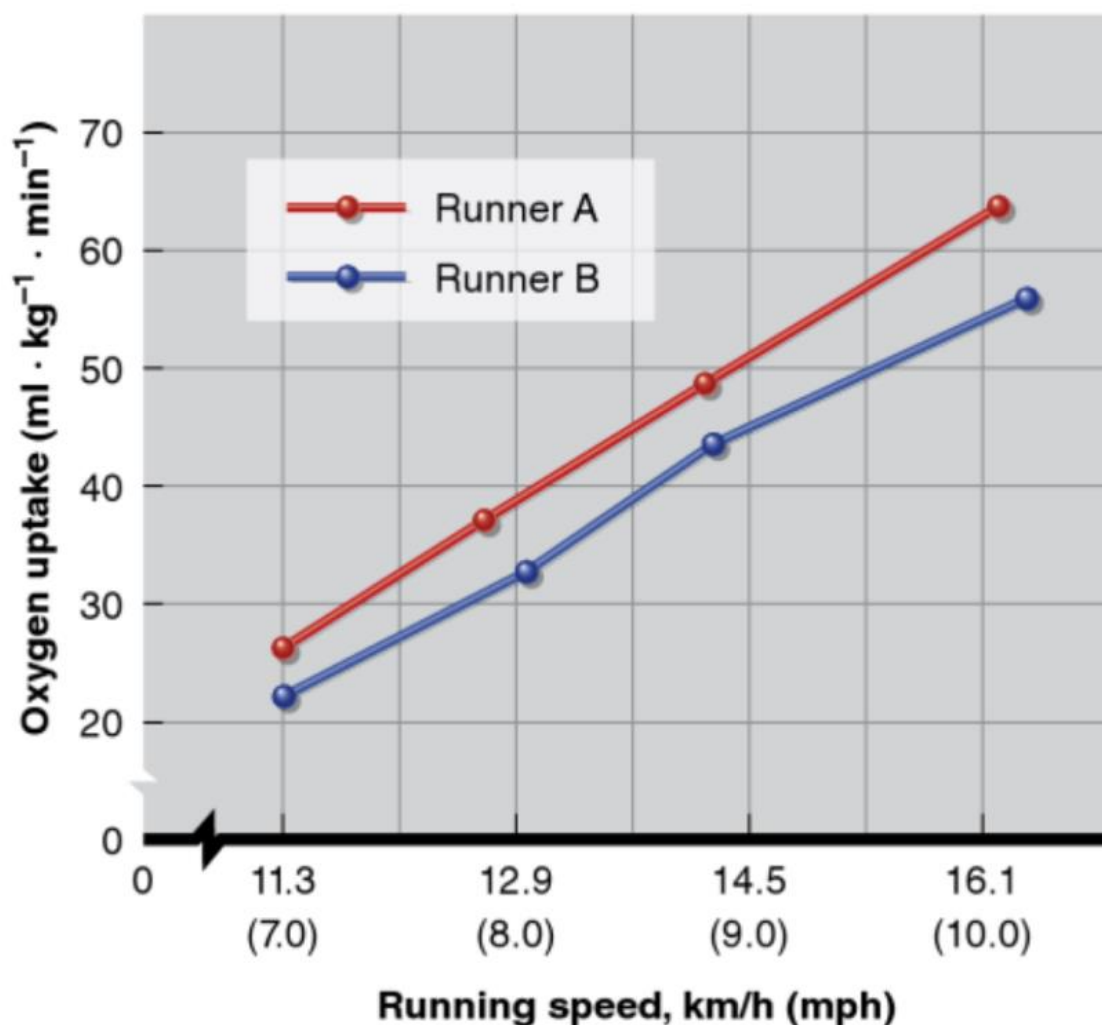


Figura 6. El consumo de oxígeno de dos corredores con valores iguales de $VO_{2\max}$, pero con diferente economía de carrera.

Nota. Recuperado de “Physiology of Sport and Exercise”, de Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L., 1994, *Human kinetics*, Vol. 524, p. 131.

Numerosos estudios han observado que la economía de carrera está estrechamente relacionada con el rendimiento en carreras de larga distancia (Costill, 1967; Conley & Krahenbuhl, 1980; Costill et al., 1973; Conley et al., 1984; Di Prampero et al, 1993; Pollock, 1977), y que la economía de carrera predice de mejor manera el rendimiento entre corredores de élite (Conley & Krahenbuhl, 1980; Costill et al., 1973).

Habiendo expuesto ya de forma breve los diferentes parámetros fisiológicos que pueden influir en el transcurso de una prueba de maratón, el principal objetivo de esta revisión sistemática es el de analizar y comparar diversos estudios científicos que estudien los principales factores fisiológicos que influyen en el rendimiento deportivo de los corredores de maratón de élite, para así poder conocer cuál de esos factores fisiológicos puede ser más determinante a la hora de conseguir el máximo rendimiento en este tipo de pruebas.

MÉTODOS

Estrategia de búsqueda y selección de los estudios

El día 27 de octubre de 2020 se llevó a cabo la búsqueda de la literatura científica. Para ello se utilizó la base de datos PubMed, y solo se tuvo en cuenta la literatura científica escrita en inglés y publicada a partir del año 1970. A la hora de realizar la búsqueda, la citas sobre conferencias fueron excluidas.

En la ya mencionada base de datos se aplicaron diferentes estrategias de búsqueda, con el fin de hacerse con un amplio, pero a su vez específico número de estudios científicos acerca del tema en cuestión.

De este modo, se buscó el término “*marathon*” en el título, y fue combinado con las diferentes palabras claves utilizando los diferentes operadores booleanos (AND, OR, NOT): (*marathon*[Title]) AND (*performance* AND *physiology* OR *physiological factors* OR *running economy* OR $VO_2 \text{ max}$) NOT (*ultra-marathon*[Title] OR *ultra marathon*[Title] OR *half marathon*[Title]). Una vez realizada esta búsqueda no se aplicó ningún filtro extra, y todos los artículos encontrados se tuvieron en cuenta para una posterior selección.

Criterios de inclusión y exclusión

Una vez realizada la primera búsqueda, se seleccionaron los estudios que cumpliesen los siguientes criterios de inclusión: a) escritos y publicados en inglés; b) publicados posteriormente a 1970; c) artículos de revistas científicas (*journal articles*); d) intervenciones

con corredores de élite¹; e) factores fisiológicos determinantes en el rendimiento de una maratón como temática principal; f) realización de test máximos o submáximos²; g) medición de alguno de los siguientes parámetros: $VO_{2\max}$, concentración de lactato en sangre, consumo de oxígeno a intensidades submáximas (% $VO_{2\max}$), economía de carrera, o RER (*Respiratory Exchange Ratio*); h) las revisiones sistemáticas fueron excluidas.

La ya mencionada estrategia de búsqueda reportó un total de 427 artículos, a los cuales se añadieron de manera manual 5 estudios más. Estos 5 estudios fueron encontrados en la base de datos PubMed cuando se realizó la primera búsqueda, ya que aparecían con la etiqueta de “estudios similares”. De este modo, tras la primera búsqueda, se recolectó un total de 432 estudios, de los cuales todos se tuvieron en cuenta para una posterior selección (*Figura 7*).

Como se muestra en la *Figura 7*, de los 432 artículos encontrados, 47 fueron automáticamente excluidos por no cumplir alguno de los tres primeros criterios de inclusión (publicaciones en inglés, posteriores a 1970, o artículos de revistas científicas). De la misma manera, con los 385 artículos restantes, se realizó una primera lectura rápida del título. Mediante esta estrategia y aplicando los criterios de inclusión d (los estudios debían haberse llevado a cabo con corredores de élite) y e (los estudios debían de tratar los factores fisiológicos determinantes en el rendimiento de una maratón), un total de 197 artículos fueron excluidos. Entre ellos, 143 se descartaron por no haberse llevado a cabo con corredores de élite, y 54 por abarcar una temática distinta a la de los factores fisiológicos limitantes en una maratón.

Una vez aplicados los criterios de inclusión, se realizó una lectura del resumen de los 188 estudios restantes, para evaluar la relevancia de los diferentes trabajos. Basándonos en la información recogida en el resumen, 165 estudios fueron descartados y solo 23 fueron determinados como potencialmente relevantes, y se procedió a su lectura completa.

Entre estos 23 artículos, 7 se trataban de revisiones sistemáticas, por lo que fueron excluidos de la selección. Los 16 artículos restantes, todos ellos habían llevado a cabo intervenciones con corredores de maratón. Sin embargo, en 8 casos, estas intervenciones se realizaron con corredores de maratón de un alto nivel, pero no se trataban de deportistas de clase mundial o de élite. Es decir, a pesar de que en esas 8 intervenciones se utilizaran como

¹ Se consideró corredores de élite a aquellos que hayan sido capaces de acabar una maratón en un tiempo igual o inferior a 2:12 h en hombres y a 2:35 h en mujeres.

² Fueron válidos tanto los test de campo como los test de laboratorio.

sujetos a corredores con una mejor marca personal de alrededor 2:20-2:30 horas, no cumplían el requisito previamente expuesto de tener una marca inferior a 2:12 horas en hombres y 2:35 en mujeres. Por este motivo esos 8 estudios fueron excluidos (*Figura 7*).

Finalmente, entre los 8 artículos restantes, dos de ellos fueron descartados, ya que se desviaban mucho de la temática sobre la relación de los diferentes factores fisiológicos y el rendimiento en maratón. De este modo, como se puede observar en la *Figura 7*, solo 6 artículos cumplieron todos los criterios de inclusión establecidos y fueron utilizados para esta revisión.

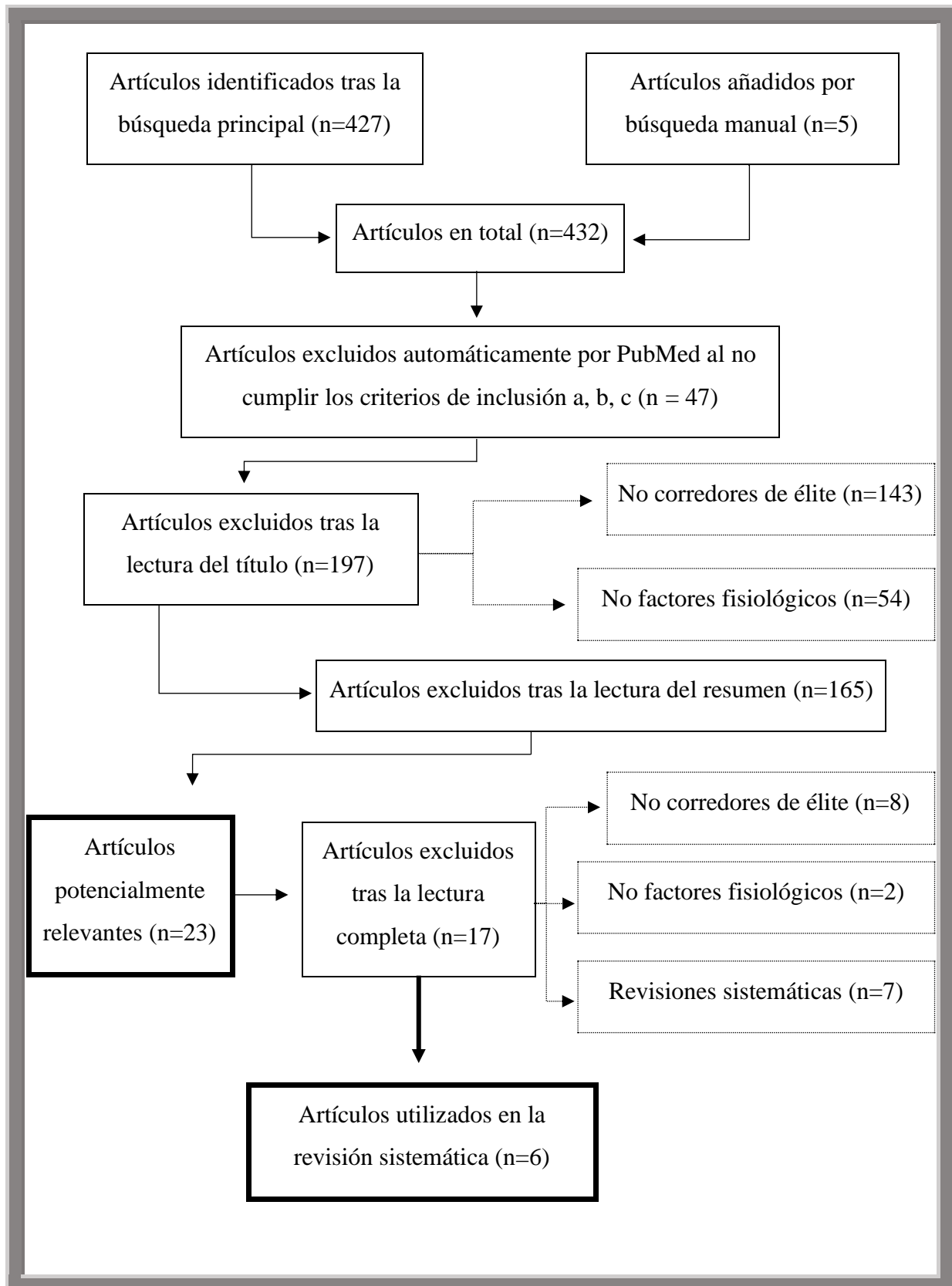


Figura 7. Diagrama de flujo de la búsqueda y selección de la literatura científica utilizada para la revisión sistemática.

Nivel de evidencia y calidad de los estudios

Con el fin de valorar el nivel de evidencia y la calidad de los estudios seleccionados, se utilizaron dos escalas como se puede observar en la *Tabla 2*. Una de ellas fue el nivel de evidencia de Oxford (Oxford Centre for Evidence-based Medicine, 2009), y la otra la escala de PEDro (De Morton, 2009). El nivel de evidencia de Oxford otorga un valor del 1a al 5, siendo el valor 1a revisiones sistemáticas sobre pruebas controladas aleatorizadas de alta calidad, y el valor 5 a opiniones de expertos. La escala de PEDro consta de 11 ítems de rigor científico. Los ítems 2-11 pueden tener una puntuación de 0 o 1, por lo que el valor más alto en la escala de PEDro será un 10 y el más bajo un 0.

Tabla 2. Valor de la escala de PEDro y nivel de evidencia de los estudios seleccionados

Estudio	Valor de la escala de PEDro*											Nivel de evidencia	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		Total
Costill et al., 1971	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	3b
Pollock, 1977	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2b
Tam et al., 2012	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	6	2b
Billat et al., 2001	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	5	2b
Andrew et al., 2020	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	5	2b
Legaz et al., 2006	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	5	2b
TOTAL												4,17 ± 1,17	

*Ítems en la escala de PEDro: 1 = los criterios de inclusión fueron especificados; 2 = los sujetos fueron asignados al azar a los grupos; 3 = la asignación fue oculta; 4 = los grupos fueron similares al inicio con relación a los indicadores de pronóstico más importantes; 5 = todos los sujetos fueron cegados; 6 = todos los terapeutas que administraron la terapia fueron cegados; 7 = todos los evaluadores que midieron al menos un resultado clave fueron cegados; 8 = Las medidas de al menos uno de los resultados clave fueron obtenidas de más del 85% de los sujetos inicialmente asignados a los grupos; 9 = se presentaron resultados de todos los sujetos que recibieron tratamiento o fueron asignados al grupo control, o cuando esto no pudo ser, los datos para al menos un resultado clave fueron analizados por “intención de tratar”; 10 = los resultados de comparaciones estadísticas entre grupos fueron informados para al menos un resultado clave; 11 = el estudio proporciona medidas puntuales y de variabilidad para al menos un resultado clave.

RESULTADOS

Características de los estudios

Las características generales de los 6 estudios seleccionados se muestran de manera resumida en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Tabla resumen de las características generales de los estudios seleccionados.

Estudio	Participantes	Parámetros estudiados	Tests
Costill et al., 1971	<ul style="list-style-type: none"> • Corredor maratón élite (n = 1) 	VO ₂ RER [La ⁻] FC	Tapiz rodante: <ul style="list-style-type: none"> • Test máximo progresivo-continuo: <ul style="list-style-type: none"> ○ 16 km/h inclinación 0 % (+ 0,8 km/h c/ 2') • Test submáximos (n = 8) a diferentes velocidades
Tam et al., 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores maratón keniatas élite (n = 10) • Corredores maratón europeos alto nivel (n = 9) 	VO ₂ SpO ₂ RER [La ⁻] FC RE V _{max} / V _{LT}	Pista de atletismo: <ul style="list-style-type: none"> • Test incremental-fraccionado: <ul style="list-style-type: none"> ○ 12 km/h (+ 2 km/h) x 4'; rec/ 5' (hasta 20 km/h) + 800 m max
Billat et al., 2001	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores maratón élite (n = 10) <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 hombres; 5 mujeres • Corredores maratón alto nivel (n = 10) <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 hombres; 5 mujeres 	VO ₂ RER [La ⁻] FC RE V _{max} / V _{LT} Factores entrenamiento	Pista de atletismo: <ul style="list-style-type: none"> ○ Test 10 km (V_{maratón}) ○ Test 1 km (V_{max})

Estudio	Participantes	Parámetros estudiados	Tests
Legaz et al., 2006	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores maratón élite (n = 10) • Corredoras maratón élite (n = 8) 	VO ₂ RER [La ⁻] FC RE VO _B LA / V _{LT}	Tapiz rodante: <ul style="list-style-type: none"> • Test máximo incremental-fraccionado: <ul style="list-style-type: none"> ○ 8 km/h inclinación 1 % (+ 2 km/h) x 3'; rec/30"
Pollock, 1977	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores élite (n = 20) <ul style="list-style-type: none"> ○ 8 maratonianos ○ 11 media-larga distancia • Corredores alto nivel (n= 8) • Sujetos no entrenados (n = 10) 	VO ₂ RER [La ⁻] FC RE SYS / DIA Volumen cardiaco	Tapiz rodante: <ul style="list-style-type: none"> • Test máximo progresivo-continuo: <ul style="list-style-type: none"> ○ 18 km/h inclinación 0 % (+ 2,5 % c/ 2') • Test submáximo progresivo-continuo: <ul style="list-style-type: none"> ○ 7' (16,2 km/h) + 4' (19,8 km/h)
Andrew et al., 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Corredores resistencia élite (n = 16) 	VO ₂ RER [La ⁻] FC RE	Tapiz rodante: <ul style="list-style-type: none"> • Test incremental-fraccionado: <ul style="list-style-type: none"> ○ 17 km/h inclinación 1 % (+ 1 km/h) x 3'; rec/60" Pista atletismo: <ul style="list-style-type: none"> • Test progresivo-continuo: <ul style="list-style-type: none"> ○ 800 m (17 km/h) + 2400 m (21,1 km/h) + 400 m (max)

A continuación, se presentan los resultados más significativos de cada uno de los estudios incluidos para esta revisión.

Determinants of marathon running success (Costill et al., 1971)

En la intervención llevada a cabo por Costill et al. (1971), se evaluaron las respuestas metabólicas que obtenía un corredor de maratón de élite (27 años; 188 cm; 73,1 kg; mejor marca personal: 2:08:33) al ser sometido a diferentes tests de carrera a pie realizados en un tapiz rodante. Para ello, se realizaron un total de 9 pruebas, entre las que había 7 tests submáximos y una prueba de esfuerzo máximo de carácter progresivo que se realizó en dos ocasiones. En todos los tests se monitorizaron diferentes parámetros fisiológicos, tales como la frecuencia cardiaca, el intercambio respiratorio (RER), el consumo de oxígeno (VO_2) y la concentración de lactato.

En la prueba de esfuerzo máximo, el corredor fue capaz de aguantar 15 minutos y medio, y a pesar del progresivo aumento de la velocidad, en los últimos minutos de la prueba los valores del consumo de oxígeno y de la frecuencia cardiaca se vieron estabilizados. Del mismo modo, el valor de $VO_{2\text{ max}}$ que se obtuvo fue relativamente bajo (69,7 ml/kg/min) y los valores de lactato en sangre no fueron excesivamente altos.

En las pruebas realizadas a diferentes velocidades submáximas, se observó que el porcentaje de consumo de oxígeno (% $VO_{2\text{ max}}$) que este corredor necesitaba para correr a las distintas velocidades se asemejaba mucho a los valores que tenían diferentes corredores de un nivel inferior. Cuando el sujeto tuvo que realizar un esfuerzo de 30 minutos a la velocidad equivalente a su mejor marca en maratón, se observó que era capaz de utilizar el 86 % de su capacidad aeróbica máxima (86 % $VO_{2\text{ max}}$).

Con los resultados obtenidos, Costill et al. (1971) llegaron a la conclusión de que a pesar de que los parámetros fisiológicos que se pueden medir en un laboratorio ($VO_{2\text{ max}}$, % $VO_{2\text{ max}}$, concentración de lactato...) están bastante relacionadas con el rendimiento que se va a tener en una prueba de maratón, y que por lo tanto, pueden estimar de manera bastante realista el tiempo en el que se completará la prueba, no se pueden excluir de la ecuación los diferentes factores externos que obviamente van a tener su influencia a lo largo de la prueba.

Energetics of running in top-level marathon runners from Kenya (Tam et al., 2012)

Tam et al. (2012) tenían el objetivo de determinar el VO_2max , la economía de carrera y el % VO_2max que se utiliza a lo largo de la carrera de maratón en corredores keniatas de maratón de máximo nivel, y así, compáralo con los valores obtenidos en corredores europeos de alto nivel. Para ello, reclutaron a un grupo de corredores keniatas (de la etnia Kalenjin) de nivel mundial ($n = 10$; 29 ± 4 años; 172 ± 7 cm; $59,4 \pm 5,8$ kg), todos ellos con una mejor marca personal inferior a 2:09:00. Por otro lado, el grupo control estaba formado por un grupo de corredores europeos de alto nivel ($n = 9$; 33 ± 4 años; 175 ± 5 cm; $61,1 \pm 5,8$ kg), con una mejor marca en maratón similar a la de los keniatas (2:08:24).

El test a realizar se llevó a cabo en diferentes regiones a bastantes metros de altitud (Eldoret, Saint Moritz y Ortisei) y siempre en una pista de atletismo de 400 m homologada. Tras colocar conos a lo largo de la pista con una separación de 50 metros entre ellos, los sujetos fueron sometidos a un test incremental en el que la velocidad inicial era de 12 km/h y esta aumentaba en 2 km/h cada 4 minutos hasta llegar a los 20 km/h. La velocidad a seguir la marcaba uno de los investigadores quien iba en una bicicleta con un metrónomo. Cada intervalo estaba separado por un periodo de recuperación de 5 minutos en el que se cogían muestras de sangre para medir la concentración de lactato. Como en la mayoría de los casos, todos los atletas llegaban al escalón de 20 km/h sin muestras claras de agotamiento físico, se les pidió que realizasen un último esfuerzo de 800 metros a su máximo.

A pesar de la diferencia de nivel que había entre los corredores keniatas y los europeos, los resultados que se obtuvieron en la prueba mostraron que tanto keniatas como europeos presentaban valores muy similares en diferentes parámetros que influían significativamente en el rendimiento en carreras de resistencia. Por tanto, encontraron que ambos grupos tenían valores similares de en parámetros como el VO_2max , el % VO_2max a diferentes velocidades submáximas, la economía de carrera, la velocidad aeróbica máxima (VAM), la concentración máxima de lactato en sangre, la frecuencia cardiaca máxima, el RER o la saturación de oxígeno en sangre.

De mismo modo, cabe destacar que a pesar de que no se encontrasen diferencias entre grupos en los diferentes parámetros estudiados, ambos grupos presentaban valores de VO_2max relativamente bajos (keniatas: $69,1 \pm 6,0$ ml/kg/min / europeos: $68,7 \pm 4,0$ ml/kg/min), seguramente debido a la altitud donde se realizaron los tests. Sin embargo, los sujetos de este estudio fueron capaces de utilizar un alto porcentaje de consumo de oxígeno cuando corrieron

a la velocidad equivalente a su mejor marca de maratón (keniatas: $92,9 \pm 5,7$ % / europeos: $91,9 \pm 5,0$ %).

Respecto a la economía de carrera, tanto keniatas como europeos presentaban una economía de carrera bastante similar, siendo los corredores de ambos grupos un 15 % más económicos a la hora de correr que la media de la población normal. Es decir, los sujetos de este estudio, al compararlos con un sujeto medio de la población actual, presentaban un coste energético significativamente inferior. Del mismo modo, se observó que la economía de carrera se veía bastante influenciada por la resistencia del aire, la cual, lógicamente aumentaba a medida que incrementaba la velocidad de carrera. Por ello, no es de extrañar que el coste energético de carrera de estos atletas fuese significativamente mayor al correr a 18 km/h que al hacerlo a 12 km/h.

Por otra parte, con los valores obtenidos en los diferentes parámetros fisiológicos estudiados, Tam et al. (2012) fueron capaces de estimar el ritmo medio que podrían mantener estos atletas durante una prueba de maratón, y observaron que al realizar la estimación utilizando los valores de % $VO_{2\max}$ equivalente al umbral de lactato de cada atleta, los ritmos que se obtenían eran muy similares a los ritmos reales a los que corrían en la prueba.

A la vista de los resultados obtenidos en este estudio, se observó que, a pesar de que los corredores keniatas de maratón de máximo nivel se caracterizan por tener unos valores altos, pero no exageradamente altos, de $VO_{2\max}$, un % $VO_{2\max}$ sostenible extremadamente elevado, y un coste energético bastante bajo, estas características también están presentes en corredores de maratón europeos de máximo nivel, por lo que llegaron a la conclusión de que el dominio que tienen los corredores keniatas en la prueba de maratón con respecto a los europeos no se puede explicar por las diferencias metabólicas/fisiológicas que se dan durante la carrera a pie.

Physical and training characteristics of top-class marathon runners (Billat et al., 2001)

Con el fin de comparar los factores fisiológicos y los factores de entrenamiento de corredores de maratón de clase mundial (2:06:34-2:11:59 hombres; 2:25:00-2:30:59 mujeres) y de corredores de maratón de muy alto nivel (2:12:00-2:16:00 hombres; 2:31:00-2:38:00 mujeres), Billat et al. (2001) reclutaron a 10 corredores de maratón de clase mundial (5 hombres: $33,4 \pm 2,0$ años; 172 ± 2 cm; $60,2 \pm 2,9$ kg / 5 mujeres: $32,8 \pm 2,2$; 164 ± 6 cm; $50,2 \pm 3,6$ kg) y a otros 10 corredores de muy alto nivel (5 hombres: $30,3 \pm 2,2$ años; 172 ± 2 cm; $59,3 \pm 2,5$ kg / 5 mujeres: $38,2 \pm 7,3$; 161 ± 5 cm; $49,2 \pm 4,3$ kg) y les sometieron a un test de

10 km a la velocidad equivalente a su ritmo de maratón y pasados 6 minutos a otro test de 1000 m en el que tenían que correr lo más rápido posible con el fin de determinar el $\text{VO}_2 \text{max}$.

En el test de 10 km, el ritmo de carrera a seguir (vMaratón) estaba marcado por uno de los investigadores que iba en bicicleta. A lo largo de este test y al finalizar el test de 1000 m se tomaron muestras de lactato y también se analizó el gas expirado con el fin de conocer el consumo de oxígeno.

Billat et al. (2001) observaron que en el grupo de corredores hombres, aquellos de clase mundial presentaban valores de $\text{VO}_2 \text{max}$ superiores a los de los corredores de muy alto nivel ($79.6 \pm 6.2 \text{ ml/kg/min}$ vs. $67.1 \pm 8.1 \text{ ml/kg/min}$). Sin embargo, los corredores de clase mundial eran menos económicos que los de alto nivel, ya que tenían mayor coste energético ($210 \pm 12 \text{ ml/kg/km}$ vs. $195 \pm 4 \text{ ml/kg/km}$). A la vista de esto, asumieron que la economía de carrera no era un factor que diferenciase a los corredores de más alto nivel, siendo el $\text{VO}_2 \text{max}$ el factor más determinante en esta distinción.

Respecto a las mujeres, se observó que la velocidad que se obtuvo en el test máximo de 1000 m estaba estrechamente relacionada con el rendimiento en maratón, ya que aquellas que lograron realizar el test máximo de 1000 m en menos tiempo eran precisamente las que tenían una mejor marca en la prueba de maratón.

Durante la prueba de 10 km, los corredores de clase mundial y los de alto nivel (tanto en el caso de los hombres como en el de las mujeres) presentaron valores de concentración de lactato en sangre y de RER bastante similares. Sin embargo, la frecuencia cardiaca sí que era inferior entre los corredores de clase mundial al compararla con la de los de alto nivel (hombres: $167 \pm 5 \text{ ppm}$ vs. $176 \pm 7 \text{ ppm}$ / mujeres: $165 \pm 12 \text{ ppm}$ vs. $171 \pm 4 \text{ ppm}$).

Los resultados que se obtuvieron en esta intervención señalan que los atletas de clase mundial presentaban valores de $\text{VO}_2 \text{max}$ superiores, pero a su vez tenían una peor economía de carrera. A la vista de esto, se llegó a la conclusión de que, en hombres, el $\text{VO}_2 \text{max}$ era el factor que distinguía a los corredores de clase mundial de los de muy alto nivel, siendo el $\text{VO}_2 \text{max}$ el factor más determinante en el rendimiento en maratón, y no en cambio, la economía de carrera, como se ha visto en otros estudios.

Respecto a las mujeres, las conclusiones a las que se llegaron se quedan pobres, ya que el único factor que diferenciaba a las corredoras de clase mundial y a las de muy alto nivel fue la habilidad de correr más rápido los 1000 m después de los 10 km a ritmo de maratón.

Physiological measures associated with marathon running performance in high-level male and female homogeneous groups (Legaz et al., 2006)

En el estudio de Legaz et al. (2006) analizaron diferentes parámetros fisiológicos de un grupo de corredores de maratón de máximo nivel, tanto en hombres ($n = 10$; $30,5 \pm 4,08$ años; $172 \pm 2,02$ cm; $69,7 \pm 3,5$ kg), como en mujeres ($n = 8$; $32,14 \pm 4,23$ años; $159,14 \pm 5,65$ cm; $46,74 \pm 3,53$ kg), con el fin de encontrar la posible relación entre estos parámetros fisiológicos y el rendimiento en pruebas de maratón.

Tras realizar una primera valoración antropométrica (pliegues de grasa corporal), cardiovascular (frecuencia cardíaca en reposo, diámetros de los ventrículos del corazón...) y analítica de sangre, los corredores fueron sometidos a un test progresivo en un tapiz rodante.

La velocidad inicial de la prueba fue de 8 km/h con una inclinación del 1 %, y cada 3 minutos la velocidad aumentaba en 2 km/h hasta llegar a los 20 km/h, a partir de ese punto, la velocidad aumentaba en 1 km/h cada minuto. En los últimos 30 segundos de cada intervalo, se media el intercambio de gases y al acabar cada intervalo se hacía una pausa de 30 segundos para medir la concentración de lactato en sangre. Se tomó como $VO_{2\text{ max}}$ el valor de VO_2 más alto que cada corredor obtuvo segundos previos a finalizar la prueba, y el umbral ventilatorio se determinó cuando el VO_2 empezaba a aumentar de manera no lineal.

Los resultados que se obtuvieron en este test muestran que los corredores hombres tenían valores de $VO_{2\text{ max}}$ superiores a las mujeres, seguramente debido a su mayor masa corporal. Sin embargo, a intensidades submáximas (14 km/h y 16 km/h), los hombres presentaban valores de VO_2 inferiores a las mujeres.

Respecto a la concentración de lactato en sangre, se observó que a intensidades bajas (inferiores a 16 km/h) tanto hombres como mujeres presentaban valores de lactato muy similares. Sin embargo, a intensidades un poco más elevadas (16, 18 y 20 km/h) la concentración de lactato era inferior entre los atletas hombres. Por este motivo, los hombres eran capaces de correr más rápido que las mujeres a la velocidad equivalente al umbral ventilatorio de cada atleta ($18,1 \pm 1,2$ km/h vs. $15,8 \pm 1,2$ km/h).

Al observar que los valores de $VO_{2\text{ max}}$ no guardaban una relación muy estrecha con el rendimiento en la prueba de maratón, Legaz et al. (2006) afirmaron que la velocidad aeróbica máxima (VAM), es decir, la velocidad equivalente al $VO_{2\text{ max}}$ de cada sujeto, tenía mayor importancia a la hora de estimar el rendimiento de carreras de larga distancia.

Del mismo modo, se llegó a la conclusión de que, en un grupo homogéneo de corredores de nivel similar, la superioridad en la carrera de maratón se daba mayormente por la capacidad que tienen algunos corredores de acumular menos cantidad de lactato en sangre a medida que aumenta la intensidad del ejercicio. Dicho de otra manera, los corredores que eran capaces de mantener durante un largo periodo de tiempo (~2 h) una velocidad de carrera bastante elevada (~20 km/h) produciendo una menor cantidad de lactato, tenían bastante mayor predisposición a rendir mejor en una carrera como la maratón o de características similares.

Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners (Pollock, 1977)

El estudio realizado por Pollock (1977) tenía como objetivo estudiar y analizar las características metabólicas en condiciones submáximas y máximas de diferentes corredores de élite, para observar las diferencias que puede haber entre distintos tipos de corredores.

Para ello reclutaron a 38 sujetos que posteriormente fueron asignados a 3 grupos diferentes, según su nivel de entrenamiento: corredores de resistencia de élite ($n = 20$; $26,2 \pm 2,95$ años; $177,1 \pm 6$ cm; $63,1 \pm 4,8$ kg), corredores de resistencia de buen nivel ($n = 8$; $21,3 \pm 2,55$ años; $181,1 \pm 3,9$ cm; $67,5 \pm 3,8$ kg), y estudiantes universitarios no entrenados ($n = 10$; $20,7 \pm 3,13$ años; $180,5 \pm 6,4$ cm; $63,2 \pm 5,5$ kg). Del mismo modo, dentro del grupo de corredores de élite, se crearon 2 subgrupos: uno formado por corredores de maratón ($n = 8$) y otro formado por corredores de media-larga distancia ($n = 11$).

Tras unas primeras mediciones de frecuencia cardiaca en reposo y de tensión arterial, cada participante fue sometido a dos tests, uno de ellos máximo y otro submáximo. Ambos test se realizaron en un tapiz rodante y durante la realización de estos, se midió la frecuencia cardiaca y el consumo de oxígeno. Al finalizar cada test se tomaron muestras de sangre para analizar la concentración de lactato.

El test máximo consistía en correr a una velocidad constante de 18 km/h el máximo tiempo posible, mientras que la inclinación de la cinta aumentaba cada 2 minutos en un 2,5 % hasta el agotamiento de cada atleta. Tras esta prueba máxima, los sujetos realizaron un test submáximo de 11 minutos, en el que tenían que correr los primeros 7 minutos a 16,2 km/h y los últimos 4 a 19,8 km/h. Debido a la falta de capacidad física del grupo no entrenado, los sujetos de este grupo no realizaron el test submáximo y se tuvieron que hacer unas modificaciones para el test máximo.

Como era de esperar, el grupo de corredores de élite (maratonianos y media-larga distancia) presentaban valores de $VO_{2\text{ max}}$ superiores a los que obtuvieron los sujetos de los

otros dos grupos ($76,9 \pm 3,6$ ml/kg/min vs. $69,2 \pm 3,7$ ml/kg/min vs. $54,2 \pm 6,6$ ml/kg/min), y el tiempo transcurrido en el test máximo también fue superior en los corredores de élite ($7:30 \pm 0:36$ vs. $5:30 \pm 1:01$). Del mismo modo, a intensidades submáximas (16,2 km/h y 19,8 km/h), el grupo de élite tenía valores de % $\text{VO}_{2\text{ max}}$ y de lactato inferiores a los de los corredores de buen nivel.

No obstante, se encontraron resultados interesantes cuando se compararon diferentes perfiles de corredores (maratonianos y media-larga distancia) del más alto nivel. Se observó que los corredores de media-larga distancia presentaban valores de $\text{VO}_{2\text{ max}}$ superiores a los de los maratonianos (+ 4,7 ml/kg min), y por eso rindieron mejor durante el test máximo (+ 25 s). Sin embargo, al correr a intensidades submáximas (16,2 km/h y 19,8 km/h) los corredores de maratón eran más eficientes, ya que eran capaces de utilizar un porcentaje de consumo de oxígeno (% $\text{VO}_{2\text{ max}}$) inferior para correr a la misma intensidad.

Además, cabe destacar que, dentro del grupo de élite, el valor de $\text{VO}_{2\text{ max}}$ más bajo que se encontró era precisamente el del campeón olímpico de maratón (71,3 ml/kg min), que a su vez fue el más eficiente durante el test submáximo, ya que era capaz de sostener un elevado % $\text{VO}_{2\text{ max}}$ (> 85 % $\text{VO}_{2\text{ max}}$) durante todo el transcurso de una prueba de maratón (> 2 h).

Finalmente, se llegó a la conclusión de que los corredores de élite de nivel mundial presentan características fisiológicas bastante superiores a las de corredores de alto nivel, como, por ejemplo, valores de $\text{VO}_{2\text{ max}}$ superiores. Sin embargo, cuando se trata a corredores de altísimo nivel que además son muy similares respecto al rendimiento (grupo homogéneo de corredores), parece ser que el valor de $\text{VO}_{2\text{ max}}$ no es el factor más determinante del rendimiento en carreras de larga distancia.

Physiological demands of running at 2-hour marathon race pace (Andrew et al., 2020)

Tomando como premisa que para poder romper la barrera de las 2 horas en una prueba de maratón el corredor debe ser capaz de correr a un ritmo de 2:50 min/km (21,1 km/h) con un estado metabólico estable, el reciente estudio de Andrew et al. (2020) trató de investigar el coste de oxígeno y la demanda fisiológica de los mejores corredores del mundo de maratón cuando fueron sometidos a un ritmo de carrera de 21,1 km/h.

Para ello reclutaron a 16 corredores de fondo de máximo nivel mundial (29 ± 4 años; $1,72 \pm 0,04$ m; $58,9 \pm 3,3$ kg), todos ellos con una mejor marca personal en media maratón de 59:53 0:46 y una mejor marca personal en maratón de 2:06:53 0:02:58. Además, estos atletas

habían sido elegidos para participar en la primera fase del proyecto de Nike llamado “*Breaking 2*”, proyecto que tenía como objetivo identificar a atletas de élite que tuviesen las características fisiológicas necesarias para poder bajar de las 2 horas en una prueba de maratón.

Tras una primera valoración antropométrica, los atletas fueron sometidos a dos tests incrementales, uno de ellos realizado en un tapiz rodante en el laboratorio y otro en una pista de atletismo. En el test de laboratorio, se realizaron intervalos de 3 minutos entre los que había un periodo de 60 segundos de descanso en los que se cogían muestras de lactato. La velocidad inicial del primer intervalo fue de 17 km/h y esta iba aumentando progresivamente en cada intervalo. Además, de la concentración de lactato, también se analizó el intercambio de gases, para así poder conocer el VO_2 y el RER de cada atleta. Mediante los datos de concentración de lactato se identificó el umbral de lactato y el LTP (*lactate turn-point*). Mediante los datos de VO_2 de los últimos 50 segundos de cada intervalo a intensidades submáximas se calculó la economía de carrera. Se asumió como valor de $VO_{2\text{ max}}$ el valor medio de VO_2 durante los últimos 30 segundos antes de terminar el test.

El test realizado en la pista de atletismo consistía en realizar 2 vueltas de 400 m a 17 km/h, 6 vueltas a 21,1 km/h y una última vuelta lo más rápido posible. Teniendo en cuenta que la economía de carrera solo se puede determinar a intensidades submáximas, esta se calculó solo para la velocidad de 17 km/h y para la de 21,1 km/h, pero no en cambio, para la última vuelta al máximo de cada individuo. El valor medio de VO_2 que se obtuvo durante los últimos 30 segundos de la última vuelta, se consideró como $VO_{2\text{ max}}$.

Respecto a los resultados obtenidos en el test realizado en el tapiz rodante, es importante destacar que, a pesar del altísimo nivel de todos los atletas, solo 2 de ellos fueron capaces de completar el intervalo de 22 km/h. El valor medio de $VO_{2\text{ max}}$ durante este test fue de $71,0 \pm 5,7$ ml/kg/min. Mientras que el umbral de lactato se daba al 83 ± 5 % del $VO_{2\text{ max}}$ de cada atleta, a una velocidad de $18,9 \pm 0,4$ km/h; y el LTP se daba al 92 ± 3 % del $VO_{2\text{ max}}$, a una velocidad de $20,2 \pm 0,6$ km/h.

Respecto a los resultados obtenidos en el test realizado en la pista de atletismo, cabe destacar que no todos los atletas fueron capaces de lograr un estado estable de consumo de oxígeno al correr a 21 km/h. Los 7 atletas que lograron un estado estable a esta velocidad, fueron capaces de elevar su valor de $VO_{2\text{ max}}$ en la última vuelta al tartán ($71,9 \pm 6,1$ ml/kg/min), Sin embargo, los 9 atletas que no consiguieron un estado metabólico estable, no fueron capaces de aumentar su $VO_{2\text{ max}}$ en la última vuelta, debido a la aparición del conocido como

“componente lento del VO_2 ” o “ *VO_2 slow component*”. Entre estos dos grupos de atletas no se encontraron diferencias respecto a la economía de carrera al correr a 21 km/h, ya que en ambos casos rondaba los 191 ml/kg/km. Sin embargo, había una diferencia importante, y era que el grupo que logro el estado estable necesitaba un menor % $\text{VO}_{2 \text{ max}}$ para poder mantener esa intensidad de carrera (94 ± 3 % $\text{VO}_{2 \text{ max}}$) en comparación con el grupo que no logro el estado estable (97 ± 9 % $\text{VO}_{2 \text{ max}}$).

Cuando se compararon los resultados obtenidos en el tapiz rodante y en la pista de atletismo, se observó que no había diferencias significativas en lo que respecta al $\text{VO}_{2 \text{ max}}$ (lab: 71 ml/kg/min vs. track: 71,9 ml/kg/min) y a la economía de carrera, tanto a 18,4 km/h (lab: 189 ± 14 ml/kg/km vs. track: 179 ± 16 ml/kg/km) como a 21 km/h (lab: 188 ± 20 ml/kg/km vs. track: 191 ± 19 ml/kg/km).

Cuando se trató de estimar el rendimiento en la prueba de maratón utilizando los datos obtenidos en este estudio, se observó que al utilizar el valor de VO_2 que se obtenía a la velocidad de carrera equivalente al umbral de lactato ($18,7 \pm 1,0$ km/h) se infravaloraba el tiempo estimado en maratón (2:08:32-2:23:03); y en cambio, al utilizar el VO_2 a la velocidad equivalente al LTP ($20,6 \pm 1,0$ km/h) se subestimaba el resultado (1:57:13-2:09:11). Por el contrario, cuando se realizaron los cálculos utilizando el valor de VO_2 que se tenía al 96 % del LTP de cada atleta, intensidad a la que suelen correr la mayoría de corredores de más alto nivel en una maratón (Jones & Vanhatalo, 2017), la estimación que se obtuvo del tiempo de maratón ($2:08:31 \pm 3:48$) se asemejaba bastante a la mejor marca personal de cada uno de estos atletas ($2:08:40 \pm 6:45$).

Una de las principales conclusiones que se sacaron de este estudio fue que no todos los atletas evaluados tenían las capacidades fisiológicas necesarias para completar una maratón en 2 horas, ya que muchos de ellos no eran capaces de mantener una velocidad de 21,1 km/h (velocidad necesaria para las 2 horas en maratón) en un estado metabólico estable.

A la vista de los resultados de este estudio, también se llegó a la conclusión de que factores como el $\text{VO}_{2 \text{ max}}$, la economía de carrera y las mediciones relacionadas con la concentración de lactato no tienen una relación muy estrecha con el rendimiento en maratón cuando se consideran como factores independientes entre sí; pero cuando estos factores se consideran de manera conjunta, pueden llegar a ser una herramienta muy efectiva para estimar la marca que cada atleta puede lograr en una maratón.

Finalmente, se observó que los atletas que presentaban una muy buena economía de carrera a intensidades submáximas, no eran capaces de lograr valores de $VO_{2\text{ max}}$ exageradamente altos, y *viceversa*. Es por eso que es poco común encontrarse con individuos que reúnan ambos requisitos que tan importantes son para romper la barrera de las 2 horas en una prueba de maratón.

DISCUSIÓN

Atendiendo a lo que encontramos en la literatura científica, parece ser que el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{ max}}$); el porcentaje de consumo máximo de oxígeno que se puede mantener durante la maratón (% $VO_{2\text{ max}}$ maratón), el cual está directamente relacionado con el umbral de lactato (*lactate threshold*); y la economía de carrera (*running economy*) son los principales factores fisiológicos que influyen en el rendimiento en carreras de maratón (Jones, 2006; Joyner, 1991; Joyner et al, 2011; Di Prampero, 1986; Di Prampero et al., 1986; Ferretti et al., 2011).

Consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{ max}}$)

Tradicionalmente se ha pensado que el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{ max}}$) de un individuo, es decir, la máxima capacidad que tiene el organismo para conseguir, transportar y utilizar el oxígeno (O_2) que obtiene del exterior (Kenney et al., 2015), era el marcador fisiológico que más influencia tenía en el rendimiento de pruebas de resistencia. Es cierto que cuando se comparan los valores de $VO_{2\text{ max}}$ de grupos muy heterogéneos (deportistas de resistencia y población normal), los deportistas altamente entrenados en resistencia presentan valores de $VO_{2\text{ max}}$ bastante más elevados (Billat et al., 2001). Sin embargo, cuando se trata de un grupo de corredores altamente entrenados y de un nivel muy similar, parece ser que el valor de $VO_{2\text{ max}}$ pasa a un segundo plano, y cobran mayor importancia otros factores que van a ser determinantes a la hora de conseguir el éxito en este tipo de pruebas de resistencia.

De hecho, numerosos estudios realizados con atletas de altísimo nivel especializados en pruebas de maratón, se ha encontrado que los valores de $VO_{2\text{ max}}$ de estos corredores no son exageradamente altos como se puede esperar de deportistas de este nivel (Costill et al., 1971; Tam et al., 2012; Larsen et al., 2004; Pollock, 1977). Del mismo modo, en el estudio realizado por Pollock (1977), se observó que dentro de un grupo de corredores élite, aquellos especializados en maratón presentaban valores de $VO_{2\text{ max}}$ absolutos más bajos que aquellos especializados en pruebas de media-larga distancia (1500 - 10000 m). A la vista de todo esto,

no es raro pensar que haya otros parámetros fisiológicos que puedan ser más determinantes que el valor de VO_2_{max} a la hora de realizar una prueba de maratón.

Solamente uno de los seis estudios utilizados para esta revisión llegó a la conclusión de que el valor de VO_2_{max} era el factor fisiológico que mejor distinguía a los corredores de maratón de élite de los de muy alto nivel, y que, por lo tanto, el VO_2_{max} era el factor fisiológico más determinante en el rendimiento deportivo en pruebas de maratón (Billat et al., 2001). Sin embargo, lo cierto es que esos resultados no se han encontrado nunca en la literatura científica, y que, por lo tanto, carecen de evidencia científica sólida. Además, estos resultados son totalmente contradictorios con lo que se encontró en el resto de artículos estudiados, en los que se observó, como ya se ha comentado anteriormente, que los corredores de élite de maratón presentaban valores relativamente bajos de VO_2_{max} , y que, por lo tanto, el valor de VO_2_{max} no estaba estrechamente relacionado con el rendimiento en pruebas de maratón (Costill et al., 1971; Tam et al. 2012; Legaz et al., 2006; Pollock, 1977; Andrew et al., 2020).

A pesar de que valores exageradamente altos de VO_2_{max} no es una característica distintiva de los corredores de maratón contemporáneos (Tam et al., 2012), no se puede creer en la idea errónea de un corredor de fondo pueda rendir a un alto nivel en una maratón sin un sistema de transporte de oxígeno altamente entrenado.

Por lo tanto, se puede concluir que, a pesar de que el VO_2_{max} es un buen parámetro para diferenciar a atletas de resistencia de capacidades muy diversas, se encuentran bastantes limitaciones al usar el valor de VO_2_{max} de corredores de buen nivel para predecir su rendimiento en carrera.

Para poder entender por qué el valor de VO_2_{max} puede encontrarse en un segundo plano a la hora de determinar el rendimiento en una prueba como la maratón, es importante tener en cuenta las características de esta prueba y las respuestas fisiológicas de los corredores. Los mejores corredores del planeta suelen completar esta prueba en una duración de poco más de 2 horas, pero la intensidad equivalente al VO_2_{max} de cada persona no se puede mantener a lo largo de ese largo periodo de tiempo, por lo que los atletas corren a intensidades submáximas, es decir, inferiores a su VO_2_{max} . Es por esa razón por lo que otros factores fisiológicos submáximos, como pueden ser el umbral de lactato (LT) o el porcentaje de VO_2_{max} que se puede mantener a lo largo de una maratón (% VO_2_{max} maratón), cobran mayor importancia en este tipo de pruebas. Por otra parte, se ha observado, que la velocidad aeróbica máxima (VAM), es decir, la velocidad equivalente al VO_2_{max} de cada sujeto, tiene mayor importancia que el

valor de $\text{VO}_2 \text{ max}$ a la hora de valorar las capacidades de resistencia de corredores de larga distancia (Legaz et al., 2006).

Umbral de lactato o umbral anaeróbico

Debido a la utilización de la glucosa como fuente de energía, el cuerpo humano produce lactato constantemente. En una situación de reposo, este lactato no se llega a acumular en la sangre debido a que el cuerpo tiene diferentes mecanismos fisiológicos para reutilizar ese producto metabólico y conseguir energía de él. Sin embargo, cuando se realiza ejercicio físico de media-alta intensidad, el lactato que se produce es mayor que el que se oxida por lo que su concentración en sangre aumenta (Kenney et al., 2015).

Se ha observado que mediante el entrenamiento de resistencia aumenta la capacidad oxidativa de los músculos, lo que permite “reciclar” mejor el lactato y así disminuir su acumulación. Todo esto se traduce en que individuos altamente entrenados en resistencia, tienen la capacidad de mantener una intensidad de ejercicio bastante elevada (% 80-90 $\text{VO}_2 \text{ max}$) sin acumular mucho lactato, ya que la energía necesaria se obtiene principalmente a través del metabolismo aeróbico (Kenney et al., 2015).

En relación con esta explicación fisiológica, numerosas investigaciones han observado que los corredores de maratón altamente entrenados tienden a tener valores de concentración de lactato relativamente bajos cuando son sometidos a esfuerzos que requieren correr a intensidades similares al ritmo de maratón (Costill et al., 1971; Pollock, 1977). Es por ello que los corredores de maratón de nivel mundial gozan de un umbral de lactato exageradamente elevado (% $\text{VO}_2 \text{ max LT} = \% 80-90$), lo que les permite mantener un ritmo de carrera muy elevado a lo largo de las más de dos horas que dura la prueba, utilizando principalmente el metabolismo aeróbico como medio de obtención de energía (Legaz et al., 2006). Resultados similares se encontraron en el estudio de Andrew et al. (2020), donde se observó que un grupo de corredores de maratón de nivel mundial tenía la capacidad de mantener un ritmo de carrera asombrosamente alto encontrándose en un estado metabólico estable.

Porcentaje de consumo máximo de oxígeno sostenible (% $\text{VO}_2 \text{ max}$)

El porcentaje de consumo máximo de oxígeno (% $\text{VO}_2 \text{ max}$) que se puede mantener al correr a una determinada velocidad está muy unido al rendimiento en pruebas de resistencia que impliquen realizar un esfuerzo físico a una intensidad submáxima ($> 10'$). Se ha observado que los corredores de maratón de élite, al compararlos con corredores de maratón de buen nivel, presentan un menor % $\text{VO}_2 \text{ max}$ cuando corren a una determinada velocidad submáxima

(Pollock, 1977), debido a que estos corredores de élite poseen la capacidad de mantener intensidades bastante elevadas utilizando mayormente el metabolismo aeróbico como fuente principal de energía (Legaz et al., 2006).

En muchas ocasiones se ha confiado en la afirmación de que el porcentaje de consumo máximo de oxígeno que se puede mantener a lo largo de una maratón ($\% \text{VO}_{2 \text{ max maratón}}$) está relacionado con la intensidad de carrera equivalente al umbral de lactato de cada corredor (Helgerud et al., 1990; Helgerud 1994). De hecho, para esfuerzos físicos de una duración similar a las 2 horas (por ejemplo, una maratón), se predice un $\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$ del 80 %. Sin embargo, esos valores no reflejan lo que sucede en las competiciones de maratón en la actualidad, ya que algunos estudios realizados a corredores keniatas y europeos de altísimo nivel mundial, observaron que estos atletas eran capaces de mantener un $\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$ superior al correspondiente al umbral de lactato de cada atleta (90-93 $\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$) cuando corrían a su ritmo de maratón (Tam et al., 2012; Pollock, 1977). Esto indica que los corredores de maratón de máximo nivel mundial, son capaces de mantener durante un esfuerzo de 2 horas un $\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$ bastante superior a lo estimado en estudios previos (Costill et al. 1973; Di Prampero et al, 1986; Helgerud et al., 1990; Helgerud, 1994). Estos resultados concuerdan claramente con lo que se observó en la intervención de Andrew et al. (2020), donde se encontró que los corredores de maratón de máximo nivel mundial realizaban las pruebas de maratón utilizando un altísimo porcentaje de su capacidad aeróbica máxima ($92 \pm 3 \% \text{VO}_{2 \text{ max}}$), lo que reafirma el altísimo umbral anaeróbico que tienen estos atletas de élite.

Economía de carrera (RE)

A la hora de estudiar los factores que pueden influir en el rendimiento en carreras de larga distancia, la economía de carrera tradicionalmente ha sido un factor que se ha ignorado o pasado por alto (Foster & Lucia, 2007). Sin embargo, en los últimos años se ha observado una gran relación entre la economía de carrera y el rendimiento en pruebas de resistencia (Costill, 1967; Conley & Krahenbuhl, 1980; Costill et al., 1973; Conley et al., 1984; Di Prampero et al, 1993; Pollock, 1977). Por esta razón, en los últimos años se ha empezado a prestar gran atención a este aspecto y, según lo encontrado en diferentes investigaciones, es posible que la economía de carrera sea uno de los factores más determinantes del rendimiento deportivo en pruebas de larga distancia como la maratón (Pollock, 1977; Costill et al., 1973; Daniels, 1974; Conley & Krahenbuhl, 1980; Saunders et al., 2010; Conley et al., 1984; Costill, 1967; Daniels & Daniels, 1992; Di Prampero et al, 1993; Jones, 2006).

La economía de carrera se podría definir como la demanda de energía necesaria para correr a una velocidad submáxima determinada (Barnes & Kilding, 2015; Saunders et al., 2004), y se expresa normalmente como el estado estable de consumo de oxígeno (VO_2 submáximo) a una velocidad de carrera determinada (Daniels, 1985; Conley & Krahenbuhl, 1980; Saunders et al., 2004; Anderson, 1996; Conley et al., 1984; Morgan et al., 1989). Teniendo esto en cuenta, se podría decir que la economía de carrera está estrechamente relacionada con el porcentaje de consumo máximo de oxígeno ($\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$) que se puede mantener a lo largo de una maratón. Sin embargo, la economía de carrera no es un factor exclusivamente fisiológico, ya que está determinado por una compleja interacción de diferentes aspectos fisiológicos y biomecánicos (Barnes & Kilding, 2015; Saunders et al., 2004).

En los estudios utilizados para esta revisión sistemática se han encontrado resultados aparentemente contradictorios en lo que respecta a la economía de carrera. Por un lado, encontramos estudios en los que no se encuentra una relación significativa entre la economía de carrera y el rendimiento en una prueba de maratón. Por ejemplo, en la intervención de Tam et al. (2012) no se encontraron diferencias significativas respecto a la economía de carrera entre corredores keniatas y europeos de élite. Del mismo modo, Billat et al. (2001), observaron que los corredores de maratón de clase mundial eran menos económicos que los de muy alto nivel.

Sin embargo, son bastantes los estudios que señalan la importancia de poseer una buena economía de carrera para este tipo de pruebas. Legaz et al. (2006) encontraron que, dentro de un grupo de corredores de nivel muy similar, aquellos que presentaban mejor rendimiento eran precisamente los más económicos, ya que tenían valores de frecuencia cardíaca y de consumo de oxígeno (VO_2) inferiores al correr a intensidades submáximas. Estos resultados concuerdan claramente con lo que observaron Andrew et al. (2020), quienes encontraron que los corredores de élite que eran capaces de mantener un $\% \text{VO}_{2 \text{ max}}$ inferior al correr a 21 km/h y que por lo tanto tenían un menor coste de oxígeno y mejor economía de carrera, eran precisamente los que tenían las capacidades fisiológicas necesarias para bajar de las 2 horas en una maratón.

Las pruebas de maratón de la actualidad están claramente dominadas por atletas africanos, concretamente por corredores de origen etíope y keniatas (Tucker et al., 2015; Tam et al., 2012). Estos atletas del este de África se caracterizan por tener una muy baja estatura y unos gemelos extremadamente finos, características antropométricas que permiten tener una excelente economía de carrera (Foster & Lucia, 2007). Por el contrario, debido a su baja masa muscular, estos atletas presentan valores de $\text{VO}_{2 \text{ max}}$ relativamente bajos si se comparan con otro tipo de fondistas de larga-media distancia (Pollock, 1977). En un estudio en el que

participaron los mejores corredores de maratón de la actualidad, se observó que aquellos atletas que tenían una mejor economía de carrera a intensidades submáximas, presentaban valores de $VO_{2\max}$ inferiores, pero, aun así, eran estos atletas los que lograban mejor rendimiento (Andrew et al., 2020). Teniendo en cuenta estas observaciones, se podría concluir diciendo que la economía de carrera es el factor que mejor predice el rendimiento entre corredores de élite de un nivel similar (Costill et al., 1973; Morgan et al., 1989).

A pesar de la predisposición genética que tienen los corredores del este de África para ser más económicos a la hora de correr (Foster & Lucia, 2007), existe evidencia científica de que hay distintas estrategias para mejorar la economía de carrera (Saunders et al., 2004). Teniendo en cuenta los estudios realizados hasta la fecha, parece ser que el entrenamiento de fuerza explosivo (entrenamiento polimétrico), el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT), y el entrenamiento realizado en altura y en condiciones climatológicas de calor son las estrategias que más influencia tienen en la mejora de la economía de carrera en corredores de élite (Saunders et al., 2004).

Como limitación principal es importante subrayar que este tipo de intervenciones que se realizan para determinar cuáles pueden ser los factores fisiológicos más determinantes en el rendimiento de maratón se realizan estableciendo un ritmo de carrera equivalente a la mejor marca personal de maratón de cada atleta, pero la duración de estos test es inferior a los 42 km que dura una prueba real de maratón. Por esta razón, a pesar de que este tipo de intervenciones puede ser de gran ayuda para valorar y predecir el rendimiento de los atletas, hay que tener en cuenta que en una prueba real estos atletas se van a encontrar con factores como la hipertermia, la deshidratación y la depleción de los depósitos de glucógeno, que sin lugar a duda, van a ser determinantes a la hora de poder mantener o no ese ritmo a lo largo de toda la prueba (Costill et al., 1970; Pugh et al., 1967; Saltin & Astrand, 1967).

CONCLUSIONES

Son abundantes las investigaciones que han tratado de estudiar cuáles pueden ser los factores fisiológicos más determinantes a la hora de lograr el máximo rendimiento en carreras de maratón. Parece ser que cuando se trata de corredores de maratón del máximo nivel mundial, el valor de $VO_{2\max}$ no es el aspecto fisiológico más determinante del rendimiento, por lo que pasa a un segundo plano y cobra mayor importancia la capacidad que tiene cada atleta de utilizar bajas cantidades de oxígeno y de energía para correr a una velocidad submáxima determinada, es decir, de ser más económico a la hora de correr.

Es muy posible que la supremacía que tienen los corredores del este de África en las pruebas de maratón de la actualidad se deba en gran medida a la excelente economía de carrera que poseen. Una buena economía de carrera va a depender en gran medida de las características antropométricas de los atletas, pero es importante señalar que existen diferentes estrategias que se pueden emplear para mejorar la economía de carrera en corredores de élite.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, T. (1996). Biomechanics and running economy. *Sports Medicine*, 22(2), 76-89.
2. Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Strategies to improve running economy. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(1), 37–56.
3. Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70-84.
4. Billat, V. L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., & Koralsztein, J. P. (2001). Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12), 2089–2097.
5. Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(5), 357-60.
6. Conley, D. L., Krahenbuhl, G. S., Burkett, L. N., & Millar, A. L. (1984). Following Steve Scott: physiological changes accompanying training. *The Physician and Sports Medicine*, 12(1), 103-106.
7. Costill, D. L. (1967). The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 7(2), 61-6.
8. Costill, D. L., Fink, W. J., & Pollock, M. L. (1976). Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Medicine and Science in Sports*, 8(2), 96-100.
9. Costill, D. L., Kammer, W. F., & Fisher, A. (1970). Fluid ingestion during distance running. *Archives of Environmental Health*, 21(4), 520–525.
10. Costill, D., Thomason, H., & Roberts, E. (1973). Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Medicine and Science in Sports*, 5(4), 248-252.

11. Daniels J. (1974). Physiological characteristics of champion male athletes. *Research Quarterly*, 45(4), 342–348.
12. Daniels, J. T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17(3), 332-338.
13. Daniels, J., & Daniels, N. (1992). Running economy of elite male and elite female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 483–489.
14. De Morton, N. A. (2009). The PEDro scale is a valid measure of the methodological quality of clinical trials: A demographic study. *Australian Journal of Physiotherapy*, 55, 129-133.
15. Di Prampero P. E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine*, 7(2), 55–72.
16. Di Prampero, P. E., Atchou, G., Brückner, J. C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(3), 259-266.
17. Di Prampero, P. E., Capelli, C., Pagliaro, P., Antonutto, G., Girardis, M., Zamparo, P., & Soule, R. G. (1993). Energetics of best performances in middle-distance running. *Journal of Applied Physiology*, 74(5), 2318-2324.
18. Durstine, J. L., Pate, R. R., Sparling, P. B., Wilson, G. E., Senn, M. D., & Bartoli, W. P. (1987). Lipid, lipoprotein, and iron status of elite women distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 8, 119-123.
19. Eichner, E. R. (2015). Top marathon performance: interesting debate and troubling trends. *Current Sports Medicine Reports*, 14(1), 2-3.
20. Ferretti, G., Bringard, A., & Perini, R. (2011). An analysis of performance in human locomotion. *European Journal of Applied Physiology*, 111(3), 391–401.
21. Foster, C., & Lucia, A. (2007). Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(4-5), 316–319.

22. Helgerud J. (1994). Maximal oxygen uptake, anaerobic threshold and running economy in women and men with similar performances level in marathons. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(2), 155–161.
23. Helgerud, J., Ingjer, F., & Strømme, S. B. (1990). Sex differences in performance-matched marathon runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(5), 433-439.
24. Hoogkamer, W., Snyder, K. L., & Arellano, C. J. (2018). Modeling the benefits of cooperative drafting: Is there an optimal strategy to facilitate a sub-2-hour marathon performance? *Sports Medicine*, 48(12), 2859-2867.
25. Hoogkamer, W., Snyder, K. L., & Arellano, C. J. (2019). Reflecting on Eliud Kipchoge's marathon world record: an update to our model of cooperative drafting and its potential for a sub-2-hour performance. *Sports Medicine*, 49(2), 167-170.
26. International Association of Athletics Federations. (2008). Section VIII - Road races: Distances. *IAAF Competition Rules 2012-2013* (pp. 233). Centenary Edition.
27. Jones, A. M. (2006). The Physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 1(2), 101–116.
28. Jones, A. M., & Vanhatalo, A. (2017). The 'Critical Power' Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(Suppl 1), 65–78.
29. Joyner M. J. (1991). Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *Journal of Applied Physiology*, (2), 683–687.
30. Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35-44.
31. Joyner, M. J., Ruiz, J. R., & Lucia, A. (2011). The two-hour marathon: who and when? *Journal of Applied Physiology*, 110(1), 275–277.
32. Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2015). *Physiology of Sport and Exercise* (6^a Ed). Human kinetics

33. La Torre, A., Vernillo, G., Agnello, L., Berardelli, C., & Rampinini, E. (2011). Is it time to consider a new performance classification for high-level male marathon runners? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(12), 3242-3247.
34. Lara, B., Salinero, J. J., & Del Coso, J. (2014). Altitude is positively correlated to race time during the marathon. *High Altitude Medicine & Biology*, 15(1), 64-69.
35. Larsen, H. B., Christensen, D. L., Nolan, T., & Søndergaard, H. (2004). Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Annals of Human Biology*, 31(2), 159–173.
36. Marc, A., Sedeaud, A., Guillaume, M., Rizk, M., Schipman, J., Antero-Jacquemin, J., Haida, A., Berthelot, G., & Toussaint, J. F. (2013). Marathon progress: demography, morphology and environment. *Journal of Sports Sciences*, 32(6), 524-532.
37. Matthew, L., Goodwin, M. A., James, E., & Harris, M. (2007). Blood lactate measurements and analysis during exercise: a guide for clinicians. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 1(4), 558-569.
38. Morgan, D. W., Baldini, F. D., Martin, P. E., & Kohrt, W. M. (1989). Ten-kilometer performance and predicted velocity at VO₂ max among well-trained male runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(1), 78–83.
39. Morgan, D., & Craib, M. (1992). Physiological aspects of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 456-461.
40. Ogueta-Alday, A., & García-López, J. (2016). Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo. *RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte*. 45(12), 278-308.
41. Oxford Centre for Evidence-based Medicine. (2009). Levels of evidence. *University of Oxford*, 4-5.
42. Pate, R. R., Sparling, P. B., Wilson, G. E., Cureton, K. J., & Miller, B. J. (1987). Cardiorespiratory and metabolic responses to submaximal and maximal exercise in elite women distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 8, 91-95.

43. Pollock, M. L. (1977). Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: Cardiorespiratory aspects. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301, 310–322.
44. Poole, D. C., Barstow, T. J., Gaesser, G. A., Willis, W. T., & Whipp, B. J. (1994). VO₂ slow component: physiological and functional significance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(11), 1354-1358.
45. Pugh, L. G., Corbett, J. L., & Johnson, R. H. (1967). Rectal temperatures, weight losses, and sweat rates in marathon running. *Journal of Applied Physiology*, 23(3), 347–352.
46. Saltin, B., & Astrand, P. O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 23, 353-358.
47. Saunders, P. U., Cox, A. J., Hopkins, W. G., & Pyne, D. B. (2010). Physiological measures tracking seasonal changes in peak running speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(2), 230–238.
48. Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 34(7), 465–485.
49. Tam, E., Rossi, H., Moia, C., Berardelli, C., Rosa, G., Capelli, C., & Ferretti, G. (2012). Energetics of running in top-level marathon runners from Kenya. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3797-3806.
50. Thomas, D. Q, Fernhall, B., & Grant, H. (1999). Changes in running economy during a 5 km run in trained men and women runners. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(2), 162-7
51. Tucker, R., Onywera, V. O., & Santos-Concejero, J. (2015). Analysis of the Kenyan distance-running phenomenon. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(3), 285-291.
52. Warren E. J. (2003). VO₂ max: What is it? How do you develop it? *NSCA's Performance Training Journal*, 2(2), 9.