

Article

La Disminución en el Ritmo de Carrera durante el Maratón se Relaciona de Manera Positiva con los Marcadores Sanguíneos de Daño Muscular

Juan Del Coso Garrigos, PhD¹, David Fernández², Javier Abián Vicén¹, JUAN JOSE SALINERO MARTIN¹, Cristina González-Millán¹, Alberto Areces¹, Diana Ruiz¹, César Gallo¹, Julio Calleja-González³ y Benito Pérez-González¹

¹Laboratorio de Fisiología del Ejercicio, Instituto de Ciencias del Deporte, Universidad Camilo la José Cela, Madrid, España.

²Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid, España.

³Laboratorio de Análisis de Rendimiento Deportivo, Departamento de Deporte y de Educación Física, Facultad de Ciencias del Deporte, Universidad del País Vasco, Vitoria, España.

RESUMEN

Introducción: Correr completamente una maratón es una de las actividades deportivas más desafiantes, sin embargo no se ha establecido con detalle cual es la fuente de la fatiga en la carrera durante este evento. El objetivo de esta investigación fue determinar la/las causa(s) de la fatiga en la carrera durante una maratón en el calor. **Metodología/Resultados Principales:** Para el estudio reclutamos 40 corredores aficionados (34 hombres y 6 mujeres). Antes de la carrera, se realizó la medición de temperatura corporal central, masa corporal, producción de potencia en los músculos de las piernas durante un salto con contramovimiento y se obtuvieron muestras de sangre. Durante la maratón (27°C; 27% de humedad relativa) se midió la fatiga en la carrera como la reducción del ritmo desde los primeros 5-km hasta el fin de la carrera. Después de 3 min de finalizar la maratón, se realizó la determinación de las mismas variables medidas antes del ejercicio (pre-ejercicio). **Resultados:** Los maratonistas redujeron su ritmo de carrera de $3,5 \pm 0,4$ m/s después de 5 km a $2,9 \pm 0,6$ m/s al final de la carrera ($P < 0,05$), aunque la fatiga durante la carrera experimentada por los maratonistas fue desigual. Los maratonistas con la mayor fatiga durante la carrera ($> 15\%$ reducción del ritmo) presentaron mayores valores de mioglobina (1318 ± 1411 v 623 ± 91 ug L⁻¹; $P < 0,05$), lactato deshidrogenasa (687 ± 151 v 583 ± 117 U L⁻¹; $P < 0,05$), y creatina quinasa (564 ± 469 v 363 ± 158 U L⁻¹; $P = 0,07$) después de la carrera en comparación con los maratonistas que conservaron bastante bien su ritmo de carrera a lo largo de la misma. Sin embargo, no se observaron diferencias en el cambio de masa corporal ($-3,1 \pm 1,0$ v $-3,0 \pm 1,0\%$; $P = 0,60$) ni en la temperatura corporal post-carrera ($38,7 \pm 0,7$ v $38,9 \pm 0,9^\circ\text{C}$; $P = 0,35$). **Conclusiones/Importancia:** La disminución en el ritmo de carrera durante una maratón se relacionó de manera positiva con los marcadores sanguíneos de daño muscular. Para establecer si el daño muscular durante una maratón se relaciona con factores mecánicos o metabólicos es necesario realizar investigaciones adicionales.

INTRODUCCION

La carrera es una disciplina deportiva muy popular que puede ser realizada en un amplio rango de distancias. Entre ellas, las demandas físicas severas de una carrera pedestre de maratón (42,2 km) han hecho que esta disciplina sea la competencia de resistencia más desafiante. Una miríada de variables fisiológicas, de entrenamiento o medioambientales pueden influir en el ritmo de carrera durante una competencia de maratón. Si bien se ha sugerido llevar una velocidad constante a lo largo de la carrera para aumentar al máximo el rendimiento [1], la mayoría de los maratonistas no cumple con esta recomendación. Los ganadores de maratón mantienen una velocidad de carrera relativamente constante durante la carrera, pero los corredores aficionados fijan inicialmente un paso rápido en los primeros 5-km y luego disminuyen progresivamente el paso durante el resto de la carrera, sobre todo en condiciones de calor [2]. Sin embargo, no está claro por qué los corredores aficionados no pueden mantener un ritmo constante durante una competencia de maratón.

Recientemente, se ha observado que la temperatura del aire en la que se corre la maratón se correlaciona fuertemente con la disminución en la velocidad de carrera durante la misma [3]. La temperatura medioambiental durante una carrera de maratón no sólo afecta el rendimiento en la carrera si no que también el número de casos médicos relacionados con la hipertermia (temperatura central por encima de 39°C; [4]). Normalmente se observan temperaturas corporales altas luego de una maratón [5] y sobre la base de estudios de laboratorio, se ha sugerido que la hipertermia sería una de las causas principales de la disminución en el rendimiento en la carrera [6,7]. Sin embargo, los corredores con temperaturas rectales post-carrera más alta tendieron a mantener un paso firme a lo largo de la maratón, mientras que los corredores con temperaturas post-carrera más bajas redujeron notablemente la velocidad de su paso al final de la carrera [8,9].

La deshidratación también puede afectar la disminución progresiva en el rendimiento en la carrera durante la maratón [6] y además aumentar el riesgo de sufrir enfermedades por realizar ejercicios en condiciones calurosas [10]. Los corredores de maratón son particularmente vulnerables a la deshidratación debido a la duración de la carrera, a la dificultad que tienen para beber mientras corren y a las condiciones medioambientales variables. Aunque los efectos perjudiciales de la deshidratación mayor a 2% sobre el rendimiento de resistencia están bien establecidos en estudios de laboratorio [11], los atletas se deshidratan voluntariamente durante la carrera [12] y parecería que la deshidratación no afecta el rendimiento directamente en los eventos de resistencia reales [13,14]. Se ha sugerido que la falta de estandarización de la intensidad del ejercicio observada en la mayoría de las investigaciones realizadas en el campo, sería la causa principal de los efectos contradictorios de la deshidratación sobre el rendimiento que se han observado tanto en instalaciones de laboratorio como en deportes realizados en la naturaleza [15]. Durante una maratón, hay un agotamiento progresivo de las reservas de carbohidratos de los músculos en actividad [16]. El suministro insuficiente de glucosa durante la carrera puede producir hipoglucemia y fatiga muscular [17]. Un estudio reciente propone que durante la carrera es necesario establecer un ritmo de carrera apropiado y el consumo de carbohidratos durante la carrera, para evitar el agotamiento de las reservas de carbohidratos de los maratonistas [18].

Correr una maratón es una actividad con traslado de peso que involucra tanto acciones musculares concéntricas como acciones excéntricas durante 2 a 6 horas, dependiendo del nivel del corredor. Correr completamente una maratón puede producir un daño severo en las fibras musculares [19] y la liberación de proteínas musculares (principalmente el mioglobina) al torrente sanguíneo [20]. A través de la realización de biopsias musculares de los músculos gastrocnemios antes y después de una maratón, se ha evidenciado que una carrera de maratón produce necrosis e inflamación de las fibras musculares [19]. Estas anomalías musculares se correlacionan con los informes de manifestaciones clínicas de rabdomiolisis [19] pero aún no se ha investigado su relación con la fatiga muscular durante una maratón. Nosotros hemos observado previamente una correlación positiva entre la concentración urinaria de mioglobina luego de la carrera (marcador indirecto de daño muscular) y la disminución en el rendimiento muscular después de una maratón [21]. Además, los marcadores sanguíneos de daño muscular han sido relacionados con un menor rendimiento muscular en otras actividades de resistencia [22]. Por lo tanto la ruptura muscular podría ser otro de los factores que afectan la fatiga progresiva en la carrera que experimentan los corredores de maratón aficionados. El objetivo de la presente investigación fue determinar la/causa(s) de fatiga durante la carrera (por ejemplo, la disminución del paso de carrera) durante una competencia realizada en un ambiente caluroso. Planteamos la hipótesis que la fatiga durante la competencia de maratón está relacionada con la hipertermia, la deshidratación y el daño en las fibras musculares.

METODOS

Participantes

Cuarenta y cuatro corredores de maratón amateur participaron voluntariamente en esta investigación. Cuatro participantes, no completaron la carrera y fueron excluidos de este estudio. De esta manera, los datos presentados corresponden a 40 corredores que finalizaron la maratón (34 hombres y 6 mujeres). Todos los participantes eran corredores saludables con experiencia previa en maratón. Antes de la competencia, los participantes realizaron un examen médico (que incluyó un ECG en descanso y en ejercicio) y realizaron un test incremental continuo hasta la fatiga volitiva para asegurar que todos los sujetos gozaban de buena salud. No pudieron participar en el estudio quienes tuvieran antecedentes de afecciones musculares, cardíacas o enfermedades renales, o que estuvieran tomando medicación. Las características morfológicas principales y los estados de entrenamiento antes de la competencia se sintetizan en la Tabla 1.

	n	Edad (años)	Peso (kg)	Talla (cm)	IMC (kg/m ²)	Nivel de entrenamiento	Tiempo de competencia (min)
Total	40	41±8	70±9	172±7	23,5±1,9	2,1±0,5	192±33
Velocidad conservada	22	42±8	70±9	171±7	23,9±2,1	2,1±0,5	185±30*
Velocidad reducida	18	40±9	70±9	172±7	23,0±1,6	2,2±0,6	201±35

Tabla 1. Características morfológicas, nivel de entrenamiento y tiempo de carrera de los participantes. Los valores se presentan en forma de Media±SD y fueron obtenidos en 40 corredores de maratón amateur que compitieron en la Maratón de Madrid en 2012. Nivel de entrenamiento: 1 = de 0 a 35 km por semana; 2 = de 36 a 70 km por semana; 3 = de 70 a 105 km por semana; 4 = mas de 105 km por semana según lo establecido por Smith et al.[45]. (*) Se observaron diferencias con los corredores con una disminución pronunciada en el paso de carrera, $P<0,05$.

Declaración de Ética

Los participantes fueron completamente informados de cualquier riesgo e incomodidades asociadas con los tests antes de dar su consentimiento informado por escrito para participar. El estudio fue aceptado por el Comité de Ética Camilo José Cela, y cumplió con lo establecido en la última versión de la Declaración de Helsinki.

Procedimientos Experimentales

Uno a tres días antes de la competencia, se extrajo a los participantes una muestra de 7-mL de sangre venosa de una vena antecubital para determinar los valores sanguíneos pre-ejercicio. Luego, los participantes realizaron una entrada en calor de 5 min que consistió en ejercicios dinámicos y saltos submáximos y posteriormente realizaron dos saltos verticales contramovimiento máximos en una plataforma de fuerza (*Quattrojump*, Kistler, Suiza). Para realizar este ejercicio los participantes comenzaron quietos erguidos, con el peso distribuido uniformemente en ambos pies. Los participantes colocaron las manos en la cintura para quitar la influencia de los brazos en el salto. Al oír la orden, el participante debía doblar sus rodillas y saltar tan alto como le fuera posible mientras mantenía las manos en la cintura y aterrizaba con ambos pies. La producción de fuerza máxima de puño en ambas manos se midió usando un dinamómetro de puño (*Grip-D*, Takei, Japón). Además, cada participante recibió una píldora de telemetría que debía ingerir para medir la temperatura intestinal (*HT150002*, HQ Inc, EE.UU.) durante la competencia. Se solicitó a los participantes que ingirieran la píldora con el desayuno antes de la competencia, por lo menos tres horas antes del comienzo de la maratón. Treinta minutos antes de comenzar la competencia, los participantes arribaron a la línea de salida después de realizar la entrada en calor habitual y con el mismo calzado y la misma ropa que usarían en la competencia. Se midió el peso corporal antes de la competencia con una balanza ± 50 g (Radwag, Polonia) y la temperatura corporal se midió con un grabador de datos inalámbrico (*HT150001*, HQ Inc, EE.UU.). Luego, los participantes se dirigieron a la línea de salida para correr la carrera sin ninguna instrucción sobre el ritmo que debían llevar o las bebidas que podían consumir.

La carrera de 42195m se realizó en abril de 2012 en el área que rodea una ciudad localizada a 655m de altura (Madrid, España). La altitud más baja de la carrera fue 600 m y la altitud más alta fue 720 m. La carrera se corrió con una temperatura media seca de 27±3 °C (las temperaturas variaron de 21 a 30 °C, lecturas de temperatura registradas en intervalos de 30-min desde las 0 a 5 horas después del comienzo de la carrera) y una humedad relativa de 27±2%. Durante la carrera, los participantes llevaban una pechera con un chip de cronometraje para calcular la cantidad real de tiempo que les insumía ir desde la línea de salida a la línea de llegada de la competencia (tiempo neto). El tiempo de carrera también se midió en intervalos de 5 km durante toda la competencia. Los participantes bebieron *ad libitum* y corrieron a su propio ritmo durante toda la carrera. Dentro de los 3 min de haber finalizado la carrera, los participantes fueron a una zona de finalización y realizaron dos saltos verticales contramovimiento y el test de fuerza máxima de puños tal como se

describió previamente. Se registró la masa corporal post-carrera con la misma balanza y la misma ropa utilizada para la determinación realizada antes de la carrera (pre-carrera). Aunque la medición post-carrera de la masa corporal incluyó el sudor adherido a la ropa, esto representa un error inferior al 10% para el cálculo del verdadero estado de hidratación [23]. A continuación, los participantes descansaron durante cinco minutos y se les extrajo una muestra de sangre venosa usando los procedimientos descritos previamente. El índice de esfuerzo percibido (escala de Borg) fue calculado por los mismos participantes usando una escala analógica visual con los mismos tiempos que se utilizaron para obtener las muestras de sangre. Se solicitó a los participantes que evitaran beber hasta que se les tomaran las muestras de sangre. La deshidratación durante la carrera se calculó como la reducción porcentual en la masa corporal (pre versus post competencia), asumiendo que los cambios en la masa corporal se produjeron por una reducción en el contenido de agua de los participantes.

Muestras de Sangre

Una alícuota de la muestra de sangre (2 mL) se introdujo en un tubo con EDTA para determinar la concentración de hemoglobina, el hematocrito, el recuento de glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas mediante un analizador hematológico (LH750, Beckmann Coulter, EE.UU.). Los cambios en el volumen de sangre y volumen de plasma con respecto a los valores obtenidos al inicio en reposo, fueron calculados con las concentraciones de hemoglobina y con el hematocrito. La sangre restante (5 mL) fue coagulada y se separó el suero por centrifugación (10 min a 5000 g). En la porción sérica, se analizaron parámetros como osmolalidad (1249, Advance 3MO, España), marcadores sanguíneos de daño muscular (mioglobina, creatina quinasa y lactato deshidrogenasa) y se evaluaron las enzimas hepáticas con un analizador automático (AU5400, Beckman Coulter, EE.UU.).

Análisis Estadísticos

Inicialmente, analizamos la normalidad de cada variable con el test de Kolgomorov-Smirnov. Los cambios en las variables entre los valores obtenidos antes de la carrera (pre) y los obtenidos después de la carrera (post) se analizaron con el test *t* de Student para muestras apareadas. Para simplificar la presentación de los datos de fatiga durante la carrera, los maratonistas fueron agrupados en función de su disminución en el ritmo de carrera desde el primer intervalo de 5 km hasta el fin de la carrera. Establecimos dos grupos, uno con corredores que mantuvieron su ritmo de carrera durante la competencia y otro con corredores que presentaron valores elevados de fatiga durante la carrera (una reducción en el paso de carrera superior a 15%). La comparación entre estos grupos se realizó con el test *t* de Student para muestras independientes. Utilizamos la correlación de Pearson para evaluar la asociación entre dos variables. El nivel de significancia se fijó en $P < 0,05$. Los resultados se presentan en forma de Media \pm SD. El análisis estadístico fue realizado con el software SPSS v.18 (SPSS Inc., EE.UU.).

RESULTADOS

Paso de carrera y esfuerzo percibido

La velocidad de carrera durante los primeros 5 km fue de $3,5 \pm 0,4$ m/s y disminuyó progresivamente a $2,9 \pm 0,6$ m/s al final de la carrera (Figura 1). La reducción media del paso de carrera durante la competencia fue $16 \pm 12\%$, aunque la fatiga en la carrera entre los maratonistas fue desigual. Del total, 22 corredores mantuvieron bastante bien su velocidad de carrera durante la competencia (una reducción del paso de carrera inferior a 15%) mientras que los restantes 18 corredores redujeron significativamente su paso después de la media maratón (disminución del paso de carrera superior al 15%; Figura 2). El índice de esfuerzo percibido al final de la competencia fue 16 ± 2 puntos y fue similar entre los corredores que mantuvieron su paso (16 ± 2 puntos) y los corredores con mayor fatiga durante la carrera (16 ± 2 puntos; $P = 0,52$).

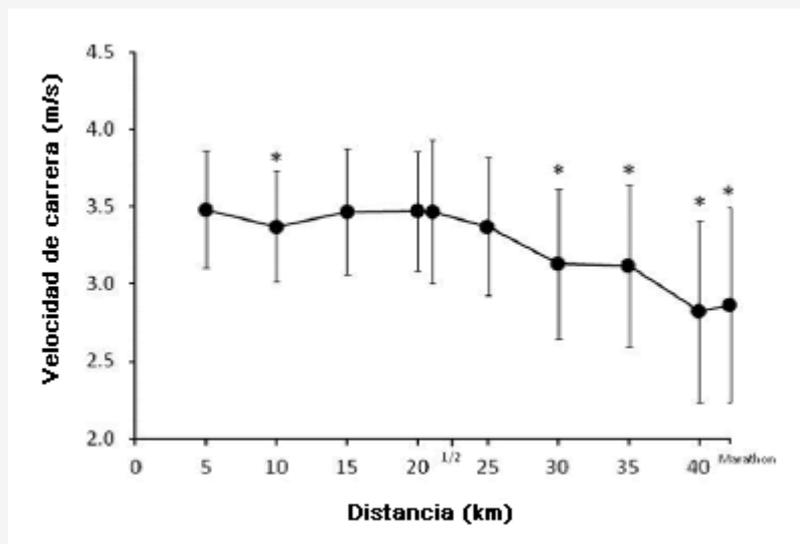


Figura 1. Ritmo de carrera durante una maratón en condiciones ambientales calurosas (27°C). Los datos se presentan en forma de Media±SD obtenidos en 40 maratonistas amateur. * Se observan diferencias respecto al ritmo de carrera al comienzo de la prueba (0 a 5 km) con $P < 0,05$.

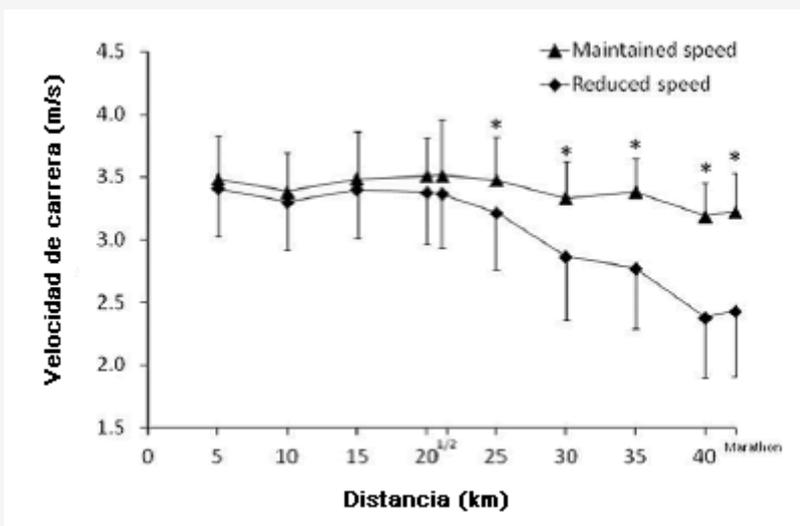


Figura 2. Ritmo de carrera durante una maratón según la fatiga en la carrera experimentada desde los primeros 5 km hasta el final de la carrera. Establecimos dos grupos: corredores que conservaron bastante bien su ritmo de carrera ($N = 22$; disminución en el paso de carrera inferior a 15%) y corredores con una disminución pronunciada en la velocidad de carrera ($N = 18$; disminución en el paso de carrera superior a 15%). (*) Se observaron diferencias con los corredores con una disminución pronunciada en el ritmo de carrera, $P < 0,05$.

Fluidos y Temperatura Corporal

Durante la competencia, todos los participantes redujeron su peso corporal (de $69,8 \pm 8,7$ kg pre-carrera a $68,0 \pm 8,4$ kg post-carrera; $P < 0,05$). Este cambio de masa corporal representó una deshidratación media de $3,0 \pm 1,0\%$ aunque el nivel de deshidratación alcanzado durante la competencia presentó un poco de variabilidad entre los individuos ya que los participantes presentaron una deshidratación que varió de 0,8 a 5,0%. El nivel de deshidratación alcanzado durante la competencia fue similar entre los grupos de corredores con índice de fatiga alto y bajo ($3,1 \pm 1,0$ versus $3,0 \pm 1,0\%$, respectivamente; $P = 0,60$). La temperatura corporal antes de la competencia fue $37,5 \pm 0,4^\circ\text{C}$ y aumentó a $38,8 \pm 0,7^\circ\text{C}$ al final de la misma ($P < 0,05$). El aumento en la temperatura corporal ($1,3 \pm 0,7^\circ\text{C}$) presentó variaciones con incrementos de 0,4 a $2,5^\circ\text{C}$. La temperatura corporal post-carrera fue similar entre los grupos de corredores con índices de fatiga altos y

bajos ($38,7 \pm 0,7$ versus $38,9 \pm 0,9^\circ\text{C}$ respectivamente; $P = 0,35$). La temperatura corporal post-carrera ($r = 0,44$; $P < 0,05$) y el aumento en la temperatura corporal presentaron una correlación positiva ($r = 0,47$; $P < 0,05$) con el ritmo medio de carrera, pero no con la deshidratación.

Producción de Fuerza de Piernas y de Brazos

Antes de la competencia, la producción de potencia máxima durante la fase concéntrica del salto fue $22,1 \pm 3,2$ W kg^{-1} y la altura del salto fue $26,6 \pm 4,6$ cm. Después de la carrera, la producción de potencia de salto ($18,3 \pm 4,2$ W kg^{-1} ; $P < 0,05$) y la altura del salto ($20,8 \pm 5,9$ centímetros; $P < 0,05$) disminuyeron significativamente un $17 \pm 14\%$ y $22 \pm 18\%$, respectivamente. Antes de la competencia la fuerza muscular del puño fue $41,0 \pm 7,8$ kg para el brazo derecho y $38,8 \pm 7,8$ kg, para el brazo izquierdo. La fuerza muscular del puño disminuyó significativamente $38,1 \pm 9,0$ y $35,9 \pm 7,7$ kg para el brazo derecho e izquierdo respectivamente al final de la competencia ($P < 0,05$).

Respuestas Observadas en Sangre Completa y en Suero

Los valores pre y post-competencia de las variables obtenidas en sangre entera se presentan en la Tabla 2. Brevemente, el volumen sanguíneo y plasmático disminuyeron significativamente durante la competencia un $3,8 \pm 3,1$ y $6,4 \pm 5,1$, respectivamente ($P < 0,05$). Como consecuencia de la reducción en el volumen plasmático, la hemoglobina y el hematocrito aumentaron significativamente después de la competencia ($P < 0,05$). El recuento de plaquetas post-ejercicio aumentó un $20 \pm 13\%$ ($P < 0,05$), el recuento de leucocitos un $163 \pm 65\%$ ($P < 0,05$) mientras que los eritrocitos solo aumentaron $2,1 \pm 1,9\%$ ($P < 0,05$). En la fracción sérica de la sangre, la osmolalidad presentó un aumento pre versus post competencia de $3,4 \pm 2,1\%$, según los cambios en el volumen sanguíneo y plasmático. Además, los marcadores séricos de daño muscular (por ejemplo, mioglobina, CK y LDH) aumentaron significativamente al final del maratón (Tabla 3). Los corredores que redujeron su paso durante la carrera de maratón presentaron valores más altos de mioglobina, CK y LDH que los corredores que mantuvieron su paso (Tabla 4).

Variable (unidades)	Pre	Post	Valor P
Eritrocitos ($10^9/\text{L}$)	4623 ± 396	4715 ± 427	$< 0,05$
Leucocitos ($10^9/\text{L}$)	$6,3 \pm 1,3$	$16,0 \pm 3,2$	$< 0,05$
Neutrofilos ($10^9/\text{L}$)	$3,5 \pm 0,9$	$13,7 \pm 3,1$	$< 0,05$
Linfocitos ($10^9/\text{L}$)	$2,2 \pm 0,8$	$1,4 \pm 0,5$	$< 0,05$
Plaquetas ($10^9/\text{L}$)	229 ± 45	275 ± 56	$< 0,05$
Hemoglobina (g/dL)	$14,3 \pm 1,0$	$14,8 \pm 1,1$	$< 0,05$
Hematocrito (%)	$42,1 \pm 3,0$	$43,4 \pm 3,2$	$< 0,05$
Cambio en el volumen sanguíneo (%)	-	$-3,8 \pm 3,1$	$< 0,05$
Cambio en el volumen plasmático (%)	-	$-6,4 \pm 5,1$	$< 0,05$

Tabla 2. Respuestas observadas en las variables correspondientes a la sangre antes (pre) y después (post) de la competencia de maratón. Los datos se presentan en forma de Media \pm SD obtenidos en 40 corredores amateur.

Variable (unidades)	Pre	Post	Valor P
Osmolalidad (mOsm/kg H_2O)	289 ± 4	297 ± 6	$< 0,05$
Glucosa (mmol/L)	$5,2 \pm 0,8$	$5,8 \pm 1,2$	$= 0,07$
Mioglobina ($\mu\text{g}/\text{L}$)	45 ± 12	952 ± 1064	$< 0,05$
CK (U/L)	176 ± 98	453 ± 348	$< 0,05$
LDH (U/L)	379 ± 68	630 ± 142	$< 0,05$
AST (U/L)	30 ± 8	45 ± 15	$< 0,05$
ALT (U/L)	27 ± 13	26 ± 11	$= 0,83$
GGT (U/L)	39 ± 37	37 ± 35	$= 0,47$
Urea (mmol/L)	$5,8 \pm 1,2$	$7,3 \pm 1,3$	$< 0,05$

Tabla 3. Respuestas observadas en el suero sanguíneo antes (pre) y después (post) de una maratón. Los datos se presentan en forma de Media \pm SD obtenidos en 40 corredores amateur. CK= Creatina Quinasa; LDH= Lactato deshidrogenasa; ALT= Alanina

Variable (unidades)	Velocidad conservada	Velocidad reducida	Valor P
Cambio en la velocidad de carrera	-8±4	-29±12	<0,05
Mioglobina (µg/L)	623±391	1318±1411	<0,05
LDH (U/L)	583±117	687±151	<0,05
CK (U/L)	369±158	564±469	=0,07
Cambio en la altura de salto (%)	23±15	30±14	=0,12
Temperatura corporal (°C)	38,9±0,9	38,7±0,7	=0,35
Osmolalidad (mOsm/kg H ₂ O)	296±6	297±6	=0,58
Cambio en la masa corporal (%)	-3,0±1,0	-3,1±1,0	=0,60

Tabla 4. Valores obtenidos luego de la carrera (post) en corredores que conservaron moderadamente su ritmo de carrera durante una maratón. (N = 22; conservaron la velocidad) y corredores que disminuyeron marcadamente su velocidad de carrera (N = 18; redujeron la velocidad). CK= Creatina Quinasa; LDH= Lactato deshidrogenasa.

DISCUSION

El objetivo de este estudio fue investigar la/las causa(s) de la fatiga en la carrera que experimentaron los maratonistas aficionados durante una carrera en un ambiente caluroso. Para este propósito, un grupo heterogéneo de 40 corredores fueron sometidos a tests fisiológicos antes y después de una maratón. La velocidad de carrera se midió por medio de un chip de cronometraje en intervalos de 5 km durante la carrera. Los resultados principales de este estudio fueron: (a) como media grupal, los corredores de maratón aficionados experimentaron una disminución progresiva en su velocidad de carrera durante una competencia en un ambiente caluroso (27 °C; 27% HR; (Figura 1) aunque la fatiga de carrera alcanzada durante la competencia presentó una gran variabilidad inter-individual (Figura 2); (b) la magnitud de deshidratación durante la maratón fue moderada (3,0±0,9%) y no se relacionó con la disminución en la velocidad de carrera (Tabla 4); (c) la temperatura corporal aumentó 1,3±0,7 °C y se correlacionó positivamente con el ritmo de carrera, pero no se correlacionó con la disminución en el mismo; (d) después de la carrera, varios marcadores de daño en las fibras musculares (por ejemplo, mioglobina, CK y LDH) aumentaron significativamente. El grupo de maratonistas con los niveles más altos de fatiga durante la carrera presentó valores más altos de mioglobina, CK y LDH al final de la competencia.

Para simplificar los datos obtenidos en esta investigación, la muestra de maratonistas fue dividida en dos grupos: corredores con un nivel bajo de reducción en el paso de carrera (reducción inferior a 15%) y corredores con una reducción drástica en su paso de carrera en media maratón (por encima del 15%; Figura 2). La Tabla 4 presenta los valores obtenidos después de la carrera (post) en las principales variables fisiológicas obtenidas en ambos grupos. Notablemente, los corredores que conservaron sustancialmente su ritmo de carrera durante la competencia de maratón presentaron valores más bajos de mioglobina, LDH y CK que los maratonistas con fatiga de carrera severa. Una limitación de esta investigación fue que no medimos las isoformas de creatinquinasa (por ejemplo MM, BB y MB) para diferenciar el origen del daño muscular. Sin embargo, asumimos que la mayor parte del aumento presentado en los marcadores sanguíneos de daño muscular en las muestras de sangre post-carrera se debió al músculo esquelético, tal como se ha observado previamente [24]. En un estudio reciente, la concentración del mioglobina urinaria post-carrera se correlacionó positivamente con la disminución en el rendimiento muscular después de una maratón en un ambiente caluroso [21]. Además, la fatiga en los músculos de las piernas se correlacionó con los marcadores sanguíneos de daño muscular al final de un triatlón de tipo *half-ironman* [22]. Dado que las causas para el daño muscular inducido por el ejercicio pueden ser de naturaleza mecánica o metabólica [25], se necesita más información para establecer si la relación entre la disminución del ritmo de carrera y el daño muscular se debe al impacto continuo de los pies durante la carrera (naturaleza mecánica; [26]) o se debe al agotamiento de los carbohidratos (naturaleza metabólica [16]).

El régimen adecuado de ingesta de fluidos durante los eventos de resistencia ha sido el tema de un debate interesante entre los fisiólogos del ejercicio. Abundante investigación realizada en condiciones de laboratorio ha demostrado que una reducción en la masa corporal superior a 2% reduce el rendimiento físico significativamente, sobre todo en condiciones de calor [11]. Bajo estas condiciones controladas, un déficit en los fluidos corporales aumenta el estrés físico en el sistema

cardiovascular y en la regulación térmica [7] y puede explicar la disminución en el rendimiento y la mayor sensación de esfuerzo. Sobre la base de estos datos, se ha recomendado que la meta de bebida durante el ejercicio sea prevenir la deshidratación excesiva (pérdida de peso corporal > 2%; [11]). Un consejo diferente para la rehidratación durante el ejercicio ha sido sugerido por Noakes [27, 28]. Este autor recomienda el uso de la sed para beber durante el ejercicio, ya que la rehidratación *ad libitum* previene la deshidratación excesiva, pero también previene el consumo excesivo de bebida, pero se necesitan más investigaciones para establecer la suficiencia de la rehidratación *ad libitum* durante el ejercicio al aire libre en ambientes calurosos.

A diferencia de lo observado en estudios de laboratorio, en investigaciones realizadas en competencias deportivas reales, los atletas se deshidratan de manera característica más de 2% al usar el estímulo de sed para reemplazar los fluidos durante el ejercicio [12, 29]. Sin embargo, esta deshidratación voluntaria no parece afectar negativamente el rendimiento en la carrera ya que los ganadores de las maratones más importantes se deshidratan 2-3% [14] y la deshidratación se asoció con una mayor velocidad de carrera durante una ultra maratón de 100 km [30]. En el presente estudio, nosotros medimos la deshidratación por medio de la reducción de masa corporal pero también a través de la osmolalidad sérica de la sangre y los cambios en el volumen sanguíneo, tal como ha sido sugerido previamente [31]. Todas estas variables indicaron que los participantes se deshidrataron moderadamente durante la maratón (la reducción en la masa corporal fue $3,0 \pm 1,0\%$). Sin embargo, sus valores no se correlacionaron con la fatiga de carrera experimentada durante la carrera en la maratón ($r=0,16$; $P=0,32$ para la deshidratación). Además, los corredores con los niveles más altos de fatiga en carrera presentaron una deshidratación similar a los corredores con una fatiga en carrera menor (Tabla 4). Estos datos sugieren que la deshidratación, por lo menos de hasta un 3%, no es la causa principal de la disminución en el rendimiento durante ejercicios al aire libre, como previamente se ha sugerido [13]. No obstante, estos datos no cuestionan la importancia de la rehidratación durante las maratones para evitar complicaciones cardiovasculares y enfermedades producidas por ejercicios en condiciones calurosas.

El inconveniente de las maratones en un ambiente caluroso incluye la competencia por el flujo sanguíneo entre las fibras del músculo esquelético (para cumplir con los requisitos de oxígeno) y los tejidos superficiales (para eliminar el calor metabólico; [7]). Esta competencia presenta un desafío para el control cardiovascular humano que finalmente reduce la perfusión de sangre a la piel. Como consecuencia, se han observado temperaturas rectales post-carrera de 38,0 a 40,6 °C durante competencias de maratón [5] u otras modalidades de resistencia similares [32]. La temperatura corporal alcanzada durante una competencia de maratón ha sido relacionada con la deshidratación [33], la tasa metabólica [9,34] y las condiciones medioambientales [6]. Sin embargo, su relación con la fatiga en la carrera no está clara. Se ha sugerido que la hipertermia podría impedir a los corredores de maratón correr a su velocidad record personal [35]. Sin embargo, los datos obtenidos después de una maratón no mostraron ninguna relación entre el rendimiento en la carrera y la temperatura corporal [34]. De manera contraria, la temperatura rectal final se correlacionó positivamente con la velocidad de carrera durante la última etapa de la maratón [9].

En esta investigación, la temperatura corporal central media al final de la carrera, determinada mediante píldoras intestinales, fue $38,8 \pm 0,7$ °C. Tanto la temperatura central corporal final ($r = 0,44$; $P < 0,05$) como el aumento en la temperatura corporal central se correlacionaron positivamente ($r = 0,47$; $P < 0,05$) con el ritmo medio en la carrera. Por otro lado, no se observó correlación entre la temperatura corporal central final y el cambio en la masa corporal ($r = 0,06$; $P=0,71$), el cambio de volumen plasmático ($r = 0,14$; $P = 0,38$) o la osmolalidad de la sangre luego de la carrera ($r = 0,08$; $P=0,62$). Se ha observado previamente que las temperaturas corporales interiores altas (~40 °C) pueden producir fatiga en sujetos entrenados durante el ejercicio prolongado [36], pero en la presente investigación la temperatura corporal final se correlacionó de manera negativa con la fatiga en la carrera experimentada durante la competencia ($r = -0,44$; $P < 0,05$). Dado que la temperatura corporal depende de la intensidad relativa del ejercicio [37], esta última correlación puede indicar que los corredores con los niveles más altos de fatiga en la carrera no pudieron mantener su paso habitual probablemente debido al daño muscular inducido por el ejercicio y así la temperatura corporal central presentó una tendencia hacia la disminución en esos sujetos (Tabla 4). Estos resultados indican que la hipertermia no fue la causa principal de la fatiga en la carrera durante una maratón en un ambiente caluroso, como se ha observado previamente en otras investigaciones [34]. Esto probablemente se debe al hecho que la temperatura corporal central media no superó los 39 °C en la mayoría de los corredores. Finalmente, parecería que el mejor estimador de temperatura corporal durante una maratón es el ritmo de la carrera o la tasa metabólica [9, 34].

Durante el ejercicio, el suministro de glucosa para el músculo esquelético activo proviene del agotamiento de las reservas de glucógeno muscular y hepático. Sin embargo, si el ejercicio es de larga duración (>1 hora), se agotan las reservas musculares y hepáticas de glucógeno [17] por lo que la glucosa sanguínea tiene que ser utilizada para proporcionar energía, lo que afecta la homeostasis de la glucosa sanguínea [38]. Se ha observado que la hipoglucemia atenúa la activación del SNC y produce un menor rendimiento físico [39]. Por esta razón, la reducción en la concentración de glucosa sanguínea se ha postulado como una fuente de fatiga muscular durante una maratón [40]. Cuando la glucosa sanguínea se mantiene a través de la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio, la fuerza muscular y la activación de SNC se conservan mejor [39]. Notablemente, analizando los valores pre-competencia versus post-competencia, los

participantes en esta investigación aumentaron la concentración de glucosa sanguínea $0,6\pm 0,6$ mmol L (Tabla 2), tal como se ha observado previamente en otros atletas que participan en eventos de resistencia [41]. Aunque nosotros no registramos la ingesta de carbohidratos durante la carrera, estudios anteriores han observado que los maratonistas tienen índices adecuados de ingesta de carbohidratos [42]. Según nuestros datos, la concentración de glucosa sanguínea se mantuvo correctamente durante un maratón en un ambiente caluroso, lo que redujo la influencia de hipoglucemia como una fuente de fatiga durante esta carrera [43].

La idea de que correr un maratón provoca cambios severos en la homeostasis de la sangre se conoce hace más de un siglo [44]. Desde entonces, diferentes estudios se han centrado en la variación en parámetros de laboratorio que experimentan los corredores de resistencia [24, 45]. En la presente investigación, observamos que una competencia de maratón produjo un aumento significativo en la hemoglobina, el hematocrito y el recuento de eritrocitos que puede ser explicado por la deshidratación y por la reducción de $6,4\pm 5,1\%$ en el volumen plasmático que experimentaron los participantes. Sin embargo, los leucocitos aumentaron $163\pm 65\%$, lo que sugiere que su aumento no sólo estaba relacionado con la variación en el volumen plasmático. El aumento en el recuento de leucocitos fue provocado predominantemente por neutrofilia, tal como ha sido observado previamente en otros estudios [45]. Se ha sugerido que las catecolaminas y el cortisol aumentan la proporción entre leucocitos circulantes-no circulantes [46]. Dado que la leucocitosis post-maratón puede ser confundida con un proceso de infección o un proceso inflamatorio, cuando se encuentra esta anomalía sanguínea en un atleta se recomienda obtener un historial de ejercicio de este atleta.

En síntesis, las demandas físicas severas de una carrera pedestre de 42-km produjo niveles diferentes de fatiga en carrera en corredores aficionados y daño en el músculo de esquelético, deshidratación modesta e hipertermia. Los marcadores sanguíneos de daño muscular (mioglobina, creatina quinasa y LDH) fueron más altos en los corredores que presentaron niveles elevados de fatiga en la prueba, en comparación con los corredores que presentaron un menor nivel de fatiga.

El aumento en la temperatura corporal durante un maratón está relacionado con el ritmo de carrera, pero no está relacionado con la deshidratación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los participantes por su valiosa contribución al estudio. Además, desean agradecer a la Organización del Maratón de Madrid por su contribución al estudio.

Contribuciones de los Autores

Revisión del manuscrito: JAV EL JJS CGM DF EL FA DR EL CG JCG BPG. Concepción y diseño de los tests: JDC JAV EL JJS CGM DFJCG. Realización de los tests: JDC JAV EL JJS CGM DF EL FA DR EL CG JCG BPG. Análisis de los datos: JDC JAV EL JJS CGM DF EL FA EL DR CGJCG BPG. Contribuyeron con reactivos/materiales/análisis: BPG JCG. Escritura del manuscrito: JDC.

REFERENCIAS

1. Gosztyla AE, Edwards DG, Quinn TJ, Kenefick RW (2006). The impact of different pacing strategies on five-kilometer running time trial performance. *J Strength Cond Res* 20: 882-886.
2. Ely MR, Martin DE, Chevront SN, Montain SJ (2008). Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1675-1680.
3. Vihma T (2010). Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol* 54: 297-306.
4. Finch CF, Boufous S (2008). The descriptive epidemiology of sports/leisure-related heat illness hospitalizations in New South Wales, Australia. *Journal of Science and Medicine in Sport* 11: 48-51.
5. Chevront SN, Haymes EM (2001). Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Med* 31: 743-762.
6. Maughan RJ, Watson P, Shirreffs SM (2007). Heat and cold: what does the environment do to the marathon runner? *Sports Med* 37: 396-399.
7. Gonzalez-Alonso J, Crandall GG, Johnson JM (2008). The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol* 586: 45-53.
8. Maughan RJ (1985). Thermoregulation in marathon competition at low ambient temperature. *Int J Sports Med* 6: 15-19.
9. Noakes TD, Myburgh KH, du Plessis J, Lang L, Lambert M, et al. (1991). Metabolic rate, not percent dehydration, predicts rectal temperature in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 23: 443-449.
10. Armstrong LE, Casa DJ, Millard-Stafford M, Moran DS, Pyne SW, et al. (2007). American College of Sports Medicine position stand. *Exertional heat illness during training and competition. Med Sci Sports Exerc* 39: 556-572.
11. Sawka MN, Burke LM, Eichner ER, Maughan RJ, Montain SJ, et al. (2007). American College of Sports Medicine position stand.

Exercise and fluid replacement. Med Sci Sports Exerc 39: 377–390.

12. Passe D, Horn M, Stofan J, Horswill C, Murray R (2007). Voluntary dehydration in runners despite favorable conditions for fluid intake. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 17: 284-295.
13. Goulet ED (2011). Effect of exercise-induced dehydration on time-trial exercise performance: a meta-analysis. *Br J Sports Med* 45: 1149–1156.
14. Beis LY, Wright-Whyte M, Fudge B, Noakes T, Pitsiladis YP (2012). Drinking behaviors of elite male runners during marathon competition. *Clin J Sport Med* 22: 254-261.
15. Casa DJ, Stearns RL, Lopez RM, Ganio MS, McDermott BP, et al. (2010). Influence of hydration on physiological function and performance during trail running in the heat. *J Athl Train* 45: 147-156.
16. Sherman WM, Costill DL, Fink WJ, Hagerman FC, Armstrong LE, et al. (1983). Effect of a 42. 2-km footrace and subsequent rest or exercise on muscle glycogen and enzymes. *J Appl Physiol* 55: 1219-1224.
17. Callow M, Morton A, Guppy M (1986). Marathon fatigue: the role of plasma fatty acids, muscle glycogen and blood glucose. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 55: 654-661.
18. Rapoport BI (2010). Metabolic factors limiting performance in marathon runners. *PLoS Comput Biol* 6: e1000960.
19. Hikida RS, Staron RS, Hagerman FC, Sherman WM, Costill DL (1983). Muscle fiber necrosis associated with human marathon runners. *J Neurol Sci* 59: 185– 203.
20. Schiff HB, MacSearraigh ET, Kallmeyer JC (1978). Myoglobinuria, rhabdomyolysis and marathon running. *QJ Med* 47: 463–472.
21. Del Coso J, Salinero JJ, Abián-Vicen J, González-Millán C, Garde S, et al. (2012). Dehydration or rhabdomyolysis to predict muscle fatigue during a marathon in the heat?. *Annual Conference of the Spanish Olympic Committee*, pp. 3-5.
22. Coso JD, Gonzalez-Millan C, Salinero JJ, Abian-Vicen J, Soriano L, et al. (2012). Muscle damage and its relationship with muscle fatigue during a half-iron triathlon. *PLoS One* 7: e43280.
23. Chevront SN, Haymes EM, Sawka MN (2002). Comparison of sweat loss estimates for women during prolonged high-intensity running. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1344-1350.
24. Kratz A, Lewandrowski KB, Siegel AJ, Chun KY, Flood JG, et al. (2002). Effect of marathon running on hematologic and biochemical laboratory parameters, including cardiac markers. *Am J Clin Pathol* 118: 856–863.
25. Tee JC, Bosch AN, Lambert MI (2007). Metabolic consequences of exercise-induced muscle damage. *Sports Med* 37: 827–836.
26. Coso JD, Salinero JJ, Abián-Vicen J, González-Millán C, Garde S, et al. (2012). Influence of body mass loss and myoglobinuria on development of muscle fatigue following a marathon in a warm environment. *Appl Physiol Nutr Metab In press*.
27. Noakes TD (2007). Hydration in the marathon: using thirst to gauge safe fluid replacement. *Sports Med* 37: 463–466.
28. Noakes TD (2007). Drinking guidelines for exercise: what evidence is there that athletes should drink "as much as tolerable", "to replace the weight lost during exercise" or "ad libitum"? *J Sports Sci* 25: 781–796.
29. Pugh LG, Corbett JL, Johnson RH (1967). Rectal temperatures, weight losses, and sweat rates in marathon running. *J Appl Physiol* 23: 347–352.
30. Rust CA, Knechde B, Knechde P, Wirth A, Rosemann T (2012). Body mass change and ultraendurance performance: a decrease in body mass is associated with an increased running speed in male 100-km ultramarathoners. *J Strength Cond Res* 26: 1505-1516.
31. Shirreffs SM (2000). Markers of hydration status. *J Sports Med Phys Fitness* 40: 80-84.
32. Laursen PB, Suriano R, Quod MJ, Lee H, Abbiss CR, et al. (2006). Core temperature and hydration status during an Ironman triathlon. *Br J Sports Med* 40: 320-325; discussion 325.
33. Wyndham CH, Strydom NB (1969). The danger of an inadequate water intake during marathon running. *S Afr Med J* 43: 893–896.
34. Maughan RJ, Leiper JB, Thompson J (1985). Rectal temperature after marathon running. *Br J Sports Med* 19: 192-195.
35. Gonzalez-Alonso J (2007). Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med* 37: 371–373.
36. Gonzalez-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, et al. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032-1039.
37. Mora-Rodriguez R, Del Coso J, Hamouti N, Estevez E, Ortega JF (2010). Aerobically trained individuals have greater increases in rectal temperature than untrained ones during exercise in the heat at similar relative intensities. *Eur J Appl Physiol* 109: 973-981.
38. Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Ivy JL (1986). Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J Appl Physiol* 61: 165-172.
39. Nybo L (2003). CNS fatigue and prolonged exercise: effect of glucose supplementation. *Med Sci Sports Exerc* 35: 589–594.
40. Coyle EF (2007). Physiological regulation of marathon performance. *Sports Med* 37: 306-311.
41. Millet GY, Tomazin K, Verges S, Vincent C, Bonnefoy R, et al. (2011). Neuromuscular consequences of an extreme mountain ultra-marathon. *PLoS One* 6: e17059.
42. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Hodgson AB, Randell R, Pottgen K, et al. (2012). Nutritional intake and gastrointestinal problems during competitive endurance events. *Med Sci Sports Exerc* 44: 344-351.
43. Meludu SC, Asomgha L, Dioka EC, Osuji C, Agbasi AC, et al. (2005). Exercise performance in relation to glucose drink and their effect on some biochemical parameters. *Niger J Physiol Sci* 20: 43–47.
44. Blake JB, Larrabee RC (1903). Observations upon long distance runners. *Boston Med Surg J* 148: 41-49.
45. Smith JE, Garbutt G, Lopes P, Pedoe DT (2004). Effects of prolonged strenuous exercise {marathon running}. on biochemical and haematological markers used in the investigation of patients in the emergency department. *Br J Sports Med* 38: 292-294.
46. McCarthy DA, Dale MM (1988). The leucocytosis of exercise. A review and model. *Sports Med* 6: 333–363.