

Efectos del calor en el rendimiento en deportes de resistencia en los diferentes dominios de intensidad-duración: artículo de revisión

Jesús Martínez-Sobrino¹, Xabier Leibar², Julio Calleja-González³, Juan del Campo-Vecino⁴

¹Federación Española de Triatlón. Madrid. ²Comité Olímpico de Estudios Superiores. Madrid. ³Department of Physical Education and Sports, Faculty of Education and Sport, University of the Basque Country, Vitoria-Gasteiz. ⁴Departamento de Educación Física, deporte y motricidad humana. Facultad de Formación de Profesorado y Educación. Universidad Autónoma de Madrid.

doi: 10.18176/archmeddeporte.00073

Recibido: 16/12/2020
Aceptado: 03/08/2021

Resumen

El ejercicio físico induce un aumento de la temperatura corporal que se ve influenciado por la intensidad de este, además de por las condiciones de estrés térmico en las que se realice. La relación potencia/velocidad-duración (PD/VD) muestra cómo el tiempo que un ejercicio puede ser mantenido depende de la potencia o velocidad producida, pudiendo diferenciarse 4 dominios de intensidad que estarán delimitados por el umbral láctico (LT), la potencia/velocidad crítica (PC/VC) y el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}). Esta revisión tiene como objetivo analizar los efectos del estrés térmico sobre el rendimiento en los diferentes dominios de intensidad-duración, así como identificar los principales mecanismos fisiológicos responsables. En los dominios de intensidad moderado (por debajo del LT) y duro (entre LT y PC/VC), el calor perjudica el rendimiento en los ejercicios que comprenden duraciones de ~40 min hasta por encima de 3h, siendo los mecanismos centrales y la depleción del glucógeno los principales contribuyentes a esa fatiga. En el dominio severo (por encima de la PC/VC), el calor afecta negativamente al rendimiento de los ejercicios máximos que van de los ~25 a ~2 min de duración, siendo los factores cardiovasculares y periféricos los limitantes principales. Sin embargo, en el dominio extremo (por encima del VO_{2max}), el calor se ha visto como un elemento clave en la consecución de mejores registros de rendimiento en esfuerzos máximos inferiores a ~2 min de duración, debiéndose estas mejoras a factores centrales y de disponibilidad energética. El calor influye en gran medida en el rendimiento de los deportes de resistencia, acelerando el fracaso de la tarea en aquellos que tienen duraciones superiores a los ~2 min, y favoreciendo aquellos de duraciones inferiores. Conocer estos mecanismos de actuación puede ayudarnos a identificar distintas estrategias para reducir o aprovechar sus efectos durante el entrenamiento y la competición.

Palabras clave:

Resistencia. Rendimiento. Fatiga. Hipertermia. Fisiología. Revisión.

Effects of heat on endurance sports performance in different intensity-duration domains: a review article

Summary

Physical exercise induces an increase in body temperature that is influenced by the exercise intensity, as well as by the heat stress conditions in which it is performed. Power/velocity-duration relationship (PD-VD) shows how long an exercise can be sustained depending on the power output or the velocity output. Four intensity domains can be differentiated, which will be delimited by the lactic threshold (LT), the critical power/velocity (CP/CV) and the maximum oxygen consumption (VO_{2max}). This review aims to analyze the effects of heat stress on performance in the different intensity-duration domains, as well as to identify the main physiological mechanisms responsible. In the moderate (below LT) and hard (between LT and CP/CV) intensity domains, heat impairs the performance of exercises ranging from ~40min to over 3h, with central mechanisms and glycogen depletion being the major contributors to this fatigue. In the severe domain (above CP/CV), heat negatively affects the performance of maximum exercises ranging from ~25 to ~2 min duration, with cardiovascular and peripheral factors being the main limitations. However, in the extreme domain (above VO_{2max}), heat has been considered as a key element in achieving better performance records in maximum efforts of less than 2 min, associating these improvements with central and energy availability factors. Heat greatly influences the performance of endurance sports, accelerating task failure in those efforts longer than ~2 min, and favoring those with shorter durations. Knowing these mechanisms of action can help us to identify different strategies to reduce or take advantage of their effects during training and competition.

Key words:

Endurance. Performance. Fatigue. Hyperthermia. Physiology. Review.

Correspondencia: Jesús Martínez Sobrino
E-mail: jesus_ms_92@yahoo.es

Introducción

La resistencia es definida como el límite de tiempo sobre el cual el trabajo a una intensidad determinada puede mantenerse¹, incrementándose la contribución energética de la vía aeróbica por encima del 50% del total a medida que el ejercicio tiene una duración superior al minuto². Diversos autores, posteriormente, definían con mayor precisión argumentando que, igualmente, es necesario distinguir entre la capacidad de resistir a la fatiga tanto física y psicológica, así como a la capacidad de recuperarse rápidamente de los esfuerzos^{3,4}. De esta forma, parece que la capacidad de resistir un determinado esfuerzo, no debería asociarse a una duración mínima y podría por lo tanto aplicarse tanto a los ejercicios continuos como a los intermitentes⁵.

En los deportes de resistencia, encontramos 5 factores fisiológicos principales que determinan el rendimiento; el máximo consumo de oxígeno (VO_{2max}), la velocidad o potencia asociada a este, la eficiencia energética, la posición ($\%VO_{2max}$) de los umbrales metabólicos (VT1 y VT2), y la reserva de velocidad o potencia anaeróbica (RVA/RPA)^{6,7}. Los efectos sobre el rendimiento de estos factores fisiológicos se pueden ver representados en la relación potencia-duración (PD) o velocidad-duración (VD).

En particular, la hiperbolicidad de la curva potencia-duración o velocidad-duración (PD/VD) muestra la relación entre la potencia o la velocidad producida y el tiempo que puede ser sostenida. Skinner y Mclellan⁸ ya clasificaron las intensidades en tres fases en relación a las respuestas fisiológicas observadas durante un ejercicio de intensidad progresivamente creciente. Sin embargo, actualmente Burnley y Jones⁹ han propuesto cuatro dominios de intensidad para explicar las respuestas bioenergéticas al ejercicio y su relación con el fracaso de la tarea, siendo esta, el punto en el que un participante no quiere o no puede continuar una tarea física⁹.

Dichos cuatro dominios de intensidad, están delimitados por tres hitos fisiológicos (umbral de lactato (LT), potencia/velocidad crítica (PC/VC) y máximo consumo de oxígeno (VO_{2max})), que separarán las intensidades sostenibles durante horas, hasta minutos e incluso segundos: intensidad moderada (potencia o velocidad por debajo del LT), dura (potencia o velocidad entre LT y PC/VC), severa (potencia o velocidad por encima del PC/VC que pueden sostenerse hasta que se alcanza el VO_{2max}), y extrema (potencia o velocidad superiores al VO_{2max})⁹.

El dominio de intensidad moderada comprende las intensidades inferiores al LT (entre el 50-60% del VO_{2max} en sujetos jóvenes y entre el 70-80% en sujetos muy entrenados¹⁰). Estas intensidades pueden ser sostenidas más allá de las 3h (p. ej: ultramaratón, trail, ciclismo en ruta ó triatlón de larga distancia), debido a que la intensidad es tan baja que los niveles de la concentración de lactato en sangre y el intercambio respiratorio (RER) se mantienen en los niveles basales durante el ejercicio estable¹¹. A medida que el ejercicio se prolonga en el tiempo, la incapacidad de producir fuerza muscular debido a un descenso de la activación de las motoneuronas (fatiga central)¹² se propone como uno de los limitantes principales del rendimiento de ultra-resistencia¹³⁻¹⁵, pudiendo producir alteraciones bioenergéticas en el músculo, además de un incremento en el reclutamiento de unidades motoras para mantener la tarea propuesta¹⁶. Por otro lado, la fatiga periférica asociada a

dichas intensidades tienen como causa más probable la depleción del glucógeno^{10,17}. Además, la deshidratación y el estrés térmico, también pueden afectar de manera adversa al rendimiento y a la percepción del esfuerzo propia durante el ejercicio de larga duración^{18,19}. A pesar de que la fatiga en el dominio de intensidad moderada es multifactorial, Burnley y Jones⁹ apuntan a que la fatiga central es el determinante principal.

Por su parte, el dominio de intensidad dura, comprende las intensidades que van desde el LT hasta la PC/VC (70-80% del VO_{2max} en sujetos jóvenes y 80-90% del VO_{2max} en sujetos muy entrenados¹⁰). La PC o VC refleja una tasa metabólica crítica a partir de la cual se delimitan el ejercicio en un estado estable metabólico (intensidad dura y moderada) del ejercicio en fase de inestabilidad metabólica (intensidad severa y extrema)^{20,21}. De ahí, la relación hiperbólica entre la potencia/velocidad desarrollada y el tiempo sostenible de la misma. La PC/VC está altamente correlacionada con el rendimiento de resistencia, asociándose con el punto de compensación respiratoria (RCP)²² y el máximo estado estable de lactato (MLSS)²³, aunque en este sentido, hay bastante controversia al respecto²⁴⁻²⁶. No es objetivo de esta revisión entrar a valorar las diferencias terminológicas y metodológicas de la PC y el MLSS (para revisión, ver^{21,27}). Por lo tanto, utilizaremos el término PC o CS como el punto de máximo estado estable metabólico que separa los dominios de intensidad dura y severa. El ejercicio en PC/VC puede ser sostenido entre 25-30 min^{10,21}, y se ha estimado que los corredores de maratón de élite compiten ~96% de su velocidad crítica²⁰. Por lo tanto, cuando se supera el LT, la tolerancia al ejercicio se limita entre los ~40 min y ~3 h²⁸, incluyendo en este dominio a pruebas como el maratón, las contrarrelojes ciclistas cercanas a la hora o los triatlones de distancia olímpica, entre otros. Las características de la respuesta fisiológica al ejercicio en este dominio son el desarrollo del componente lento del VO_2 y un aumento del [lactato] sanguíneo, que finalmente se estabilizará⁸. Jones et al.²⁹ observaron que durante el ejercicio un 10% por debajo de la PC/VC, la fosfocreatina (PCr) muscular y las concentraciones de fosfato inorgánico (Pi) y el pH alcanzaron valores constantes dentro de los primeros 2 min del ejercicio y se mantuvieron estables durante los siguientes 20 min. Sin embargo, el componente lento del VO_2 provocará que el glucógeno muscular tanto de las fibras tipo I como de las fibras tipo II se utilice a medida que avanza el ejercicio, reclutando fibras adicionales necesarias para mantener la intensidad del ejercicio, y deplecionando a mayor velocidad el glucógeno muscular^{9,16,28,30}. Por lo tanto, la depleción del glucógeno músculo esquelético puede ser clave en los procesos de fatiga en este dominio de intensidad. En este sentido, Burnley, Vanhatalo y Jones³¹, también han comprobado cómo la fatiga central puede limitar el rendimiento a estas intensidades, no existiendo un mecanismo único culpable del fracaso de la tarea.

El dominio de intensidad severa comprende los modelos de acción que van del PC/VC al VO_{2max} . Por encima de la PC/VC, los metabolitos musculares (PCr y H^+), lactato en sangre y además, el VO_2 pierden la homeostasis³², disminuyendo la eficiencia muscular, lo cual impulsa el componente lento del VO_2 a su máximo, asociando el fracaso de la tarea con el logro del VO_{2pico} y un entorno metabólico muscular "intolerable"^{33,34}. Estas intensidades de trabajo por encima de la CP/CS reclutan además a las fibras musculares de tipo II de baja capacidad oxidativa, donde la relación QO_2/VO_2 (y por lo tanto $PmvO_2$) es menor que en las

fibras de tipo I¹⁰. Además, la caída del PH provoca que la ventilación, y así la frecuencia respiratoria, aumenten³⁵, incrementándose la exigencia sobre la musculatura respiratoria, que, por necesidad, o por fatiga, puede comprometer el flujo sanguíneo a la musculatura activa³⁶, lo cual produce un estrés metabólico intramuscular³⁷. A pesar de no haber sido probado, la reducción en la excitabilidad de la neurona motora a medida que progresan las contracciones en un ejercicio de intensidad severa podría contribuir a la fatiga central¹⁰. Por lo tanto, este dominio de intensidad contempla eventos de resistencia en el rango de aprox. 2 a 25 min²⁰, abarcando una franja muy grande de eventos, por ejemplo, en el atletismo, desde aproximadamente los 800 m hasta quizás los 10.000 m, dependiendo del nivel deportivo y el sexo.

El dominio de intensidad extrema contempla todas las intensidades superiores al VO_{2max} , donde los esfuerzos son dependientes en gran parte de la vía glucolítica y de los fosfágenos. En este tipo de esfuerzos, las altas tasas de producción de ATP están fundamentalmente asociadas al desarrollo de altas velocidades o potencias. La tasa máxima de degradación de la PCr llega inmediatamente después del inicio de la contracción y comienza a disminuir a partir de los 1,3 seg, mientras que la glucólisis consigue su tasa máxima de producción de ATP posterior a los 5 seg y se mantiene durante varios seg para disminuir posteriormente². Por ello, la producción de fuerza se verá perjudicada conforme las tasas de resíntesis y utilización del ATP vayan disminuyendo. El vaciamiento casi total de las reservas de PCr, la disminución gradual del PH, la reducción de la actividad de las enzimas glucolíticas, así como problemas en los mecanismos de transmisión y la inhibición de las motoneuronas, serán los limitantes del rendimiento de intensidad extrema, entre otros muchos aún por determinar^{2,38}. Por lo tanto, el deportista fracasará en la tarea antes de que sea capaz de alcanzar el VO_{2max} . Pruebas del atletismo de los 60 m al 400-800 m entran dentro de este dominio, al igual que ciertos momentos puntuales clave de muchas disciplinas que componen los deportes de resistencia, como, por ejemplo, cambios de ritmo, sprints finales a meta.

Por lo tanto, son muchos los limitantes del rendimiento que, en cada dominio de intensidad, juegan un papel principal en el fracaso de la tarea. Sin embargo, no es objetivo de esta revisión analizar todos ellos. El objetivo de esta revisión narrativa es analizar las respuestas agudas del organismo al ejercicio en condiciones de calor, así como valorar sus efectos sobre los distintos dominios de intensidad-duración. Está demostrado científicamente cómo el estrés térmico reduce la capacidad humana de hacer ejercicio³⁹, siendo un factor determinante del rendimiento en ciertas competiciones que cada año se celebran en condiciones ambientales adversas⁴⁰.

Respuestas agudas del organismo durante el ejercicio en calor

Debemos diferenciar entre los términos estrés térmico y tensión térmica⁴¹. Hablamos de estrés térmico como las condiciones ambientales que conducen a un aumento de la temperatura corporal⁴². Sin embargo, la tensión térmica son las consecuencias fisiológicas del estrés térmico⁴³. La interacción entre ambas se trata de un mecanismo complejo que depende de variables tanto ambientales (temperatura, humedad, velocidad del viento, radiación solar, la ropa que utiliza, etc),

como del tipo de ejercicio (carrera, ciclismo, natación, etc), individuales (condición aeróbica, tamaño corporal, estado de aclimatación, estado de hidratación, etc), y de la intensidad, la duración y la estrategia de ritmo del ejercicio⁴¹.

Esta interacción multifactorial provocará la excesiva elevación de la temperatura central por encima de los valores basales de reposo (37°C) y del ejercicio a intensidad moderada en ambiente frío-templado (38°C)⁴⁴, acelerando así la fatiga inducida por hipertermia (H) y reduciendo el tiempo hasta el fracaso de la tarea. El ejercicio físico intenso puede causar un aumento de la temperatura central (Tn) por encima de los 38°C (H), alterando la actividad del área prefrontal cerebral (fatiga central)⁴⁵ y reduciendo el tiempo hasta el agotamiento durante el ejercicio en ambiente caluroso³⁹. A pesar de que la temperatura de la piel, muscular y cerebral también se ven afectadas, la temperatura central parece ser la que tiene un mayor impacto en la termorregulación fisiológica⁴⁶.

Cheung y Sleivert⁴⁷ concluyen que hay al menos dos perturbaciones homeostáticas que perjudican el rendimiento del ejercicio en condiciones de H, siendo el Sistema Nervioso Central (SNC) y la tensión cardiovascular los principales afectados. Sin embargo, Nybo *et al.*,⁴¹ proponen un modelo integrador para entender la complejidad de la fatiga inducida por la H, que comprende la tensión cardiovascular, la fatiga central, periférica y los cambios en la ventilación.

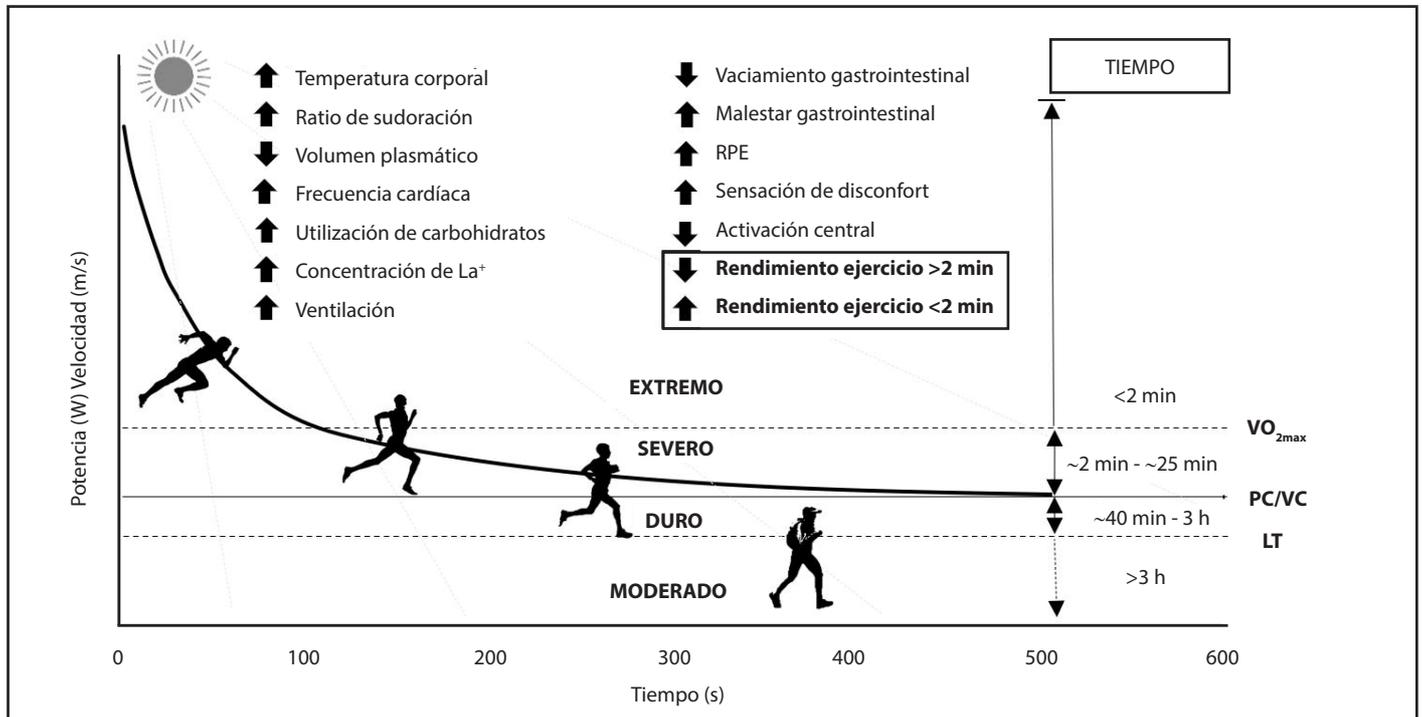
Por lo tanto, el estrés térmico perjudicará el rendimiento en el ejercicio tanto a intensidades altas como moderadas, manifestándose como una menor producción de potencia o velocidad durante pruebas contrarreloj⁴⁸⁻⁵³, reduciendo el tiempo hasta el fracaso de la tarea a intensidades fijas⁵⁴⁻⁵⁷, o en protocolos estandarizados como puede ser un test incremental^{50,58,59}.

A pesar de que la fatiga inducida por la H es multifactorial y muchos factores cambian en paralelo o se interrelacionan entre sí, intentaremos describir las posibles causas que pueden inducir a la fatiga en cada dominio de intensidad en un ambiente caluroso.

Dominio de intensidad moderada

Para nuestro conocimiento, no se han descrito estudios que comparen el rendimiento en laboratorio durante esfuerzos mayores de 3 h en condiciones control y de calor. Sin embargo, hay otros estudios que se pueden referenciar, como el de Parise y Hoffman⁶⁰, donde se comparan los datos de 50 corredores de un Trail de 161 km en dos años consecutivos, con condiciones de calor el primer año, y condiciones de temperatura templada el segundo, mostrando una reducción del rendimiento del 7% cuando se compitió con condiciones de calor. Al tratarse de una competición de una duración alrededor de las 24 h, el rendimiento se vio más afectado en los corredores más rápidos que en los más lentos, debido a que estos corrieron un mayor porcentaje de la prueba en condiciones calurosas que los que llegaban en posiciones más retrasadas. Sin embargo, los estudios de Ely, Chevront, Roberts y Montain⁶¹ y Vihma⁶² muestran cómo los corredores de menor nivel que superaban las 3 h en completar la distancia de la maratón, se veían más perjudicados conforme mayor era el estrés térmico, que los corredores que terminaban la prueba en menos tiempo. Por lo tanto, como demuestran los artículos citados, el calor tiene un papel fundamental en el desarrollo de la fatiga durante pruebas submáximas de larga duración.

Figura 1. Efectos agudos del calor sobre el ejercicio y los dominios de intensidad-duración.



Los factores que perjudican el rendimiento en el dominio de intensidad moderada debido a la hipertermia, no parecen estar asociados a factores cardiovasculares ni periféricos⁴¹. Apenas, se han encontrado cambios en el gasto cardíaco durante el ejercicio a intensidad submáxima, debido a que, a pesar de la elevación del flujo sanguíneo de la piel se asocia con un volumen sistólico menor, el aumento de la frecuencia cardíaca puede compensar el deterioro del llenado cardíaco⁶³. Además, el aumento del gasto cardíaco posibilitará el flujo sanguíneo tanto a la piel como a la musculatura esquelética activa^{64,65}, ayudando así a la termorregulación y a la utilización de oxígeno para sostener la intensidad del ejercicio.

El estrés térmico también produce cambios a nivel metabólico en el músculo, existiendo una mayor dependencia del glucógeno en condiciones de calor, incrementando así los niveles de la concentración de lactato en sangre^{59,66,67}. Son varios los estudios que afirman que la depleción de los depósitos de glucógeno no es el factor principal del fracaso de la tarea a intensidades submáximas^{41,68-70}, sin embargo para nuestro conocimiento, no ha sido demostrado en pruebas de tan larga duración, por lo que será un factor a tener en cuenta en competiciones de ultra-resistencia.

La ventilación también se verá aumentada durante el ejercicio submáximo en calor respecto a las condiciones de normotermia⁷¹, pero no se ha descrito que la fatiga de la musculatura respiratoria a dichas intensidades provoque una redistribución del flujo sanguíneo de la musculatura esquelética activa a la musculatura respiratoria⁶⁵, por lo que el rendimiento no se verá afectado por este aumento de la ventilación.

Por lo tanto, los factores centrales parecen inducir la aparición de la fatiga durante el ejercicio realizado en el dominio de intensidad

moderada. La elevada temperatura cerebral, la actividad del sistema dopaminérgico⁷², los bajos niveles de oxígeno cerebral⁷³, y la retroalimentación de la musculatura esquelética⁴⁵ pueden resultar en una activación motora perjudicada. Además, está bien documentado cómo el ejercicio en calor responde a percepciones del esfuerzo mayores que en condiciones templadas^{48,72,74}. La elevada temperatura de la piel, asociada con incomodidad térmica, así como el aumento de la ventilación, que puede provocar alteraciones en la sensación de disnea, también pueden modificar cómo se realiza y percibe el ejercicio^{37,75}.

El volumen sanguíneo esplácnico y gastrointestinal también se verán reducidos, provocando la liberación de endotoxinas que están asociadas a malestar gastrointestinal, así como a una menor producción de fuerza^{41,76}. El vaciamiento gastrointestinal también se verá reducido por el calor⁷⁷, acelerando la deshidratación y la depleción del glucógeno muscular, perjudicando el rendimiento de larga duración.

Todos estos factores acelerarán el proceso de fatiga en condiciones de calor. Sin embargo, es muy complicado separar los efectos del calor de los de la propia deshidratación.

Dominio de intensidad dura

Ely *et al.*,⁶¹ analizaron los datos de varias maratones que se realizaron a diferentes temperaturas, y compararon los resultados con el récord de la prueba, mostrando cómo hay una disminución progresiva del rendimiento en maratonianos de élite conforme mayor es la temperatura ambiental. Además, Guy *et al.*,⁷⁸ analizaron los tiempos del maratón de los Campeonatos del Mundo de la *International Association of Athletics Federations* (IAAF) desde 1999 hasta 2011, y comprobaron una reducción del

Tabla 1. Comparación de rendimiento en ejercicio aeróbico submáximo durante test contrarreloj (TT) y de tiempo hasta el agotamiento (TTE) en condiciones de calor vs. Temperatura control.

Estudio	N	Test	Ejercicio	Control	Calor	Intensidad	Rendimiento
Peiffer y Abbiss ⁴⁸	9	TT 40 km	Ciclismo	17°C	32°C	Autorregulada	-3%
Periard <i>et al.</i> ⁴⁹	8	TT 40 km	Ciclismo	20°C	35°C	Autorregulada	-7%
Lorenzo <i>et al.</i> ⁵⁰	12	TT 60 min	Ciclismo	13°C	38°C	Autorregulada	-18%
Racinais <i>et al.</i> ⁵²	8	TT 43 km	Ciclismo	8°C	36°C	Autorregulada	-16%
Periard y Racinais ⁵³	12	TT 750-Kj	Ciclismo	18°C	35°C	Autorregulada	-14%
Periard y Racinais ⁸⁶	11	TT 750-Kj	Ciclismo	20°C	35°C	Autorregulada	-14%
Keiser <i>et al.</i> ⁸⁷	8	TT 30 min	Ciclismo	18°C	38°C	Autorregulada	-13%
Schlader <i>et al.</i> ⁸⁸	9	TT 30 min	Ciclismo	20°C	40°C	Autorregulada	-21%
Romer <i>et al.</i> ⁸⁹	7	TT ~30 min	Ciclismo	15°C	35°C	Autorregulada	-24%
VanHaitsma <i>et al.</i> ⁹⁰	20	TT 40 km	Ciclismo	21°C	35°C	Autorregulada	-5%
Roelands <i>et al.</i> ⁸¹	8	TT Kj 30 min	Ciclismo	18°C	30°C	Autorregulada	-25%
Roelands <i>et al.</i> ⁸²	11	TT Kj 30 min	Ciclismo	18°C	30°C	Autorregulada	-15%
Watson <i>et al.</i> ⁸³	8	TT Kj 30 min	Ciclismo	18°C	30°C	Autorregulada	-30%
Suping <i>et al.</i> ⁸⁴	10	Maratón	Carrera	8°C	29°C	Autorregulada	-10%
de Paula Viveiros <i>et al.</i> ⁸⁵	14	TT 10 km TTE 90% MMP10 km	Carrera	20°C 20°C	40°C 40°C	Autorregulada 90% MMP10 km	-21% -48%
Galloway y Maughan ⁵⁴	8	TTE	Ciclismo	4°C 11°C 21°C	31°C 31°C 31°C	70% VO _{2max} 70% VO _{2max} 70% VO _{2max}	-36% -44% -36%
Ftaiti <i>et al.</i> ⁵⁵	7	TTE	Ciclismo	22°C	35°C	60% VO _{2max}	-34%
Rowland <i>et al.</i> ⁵⁶	8	TTE	Ciclismo	20°C	31°C	65% VO _{2max}	-29%
Girard y Racinais ⁵⁷	11	TTE	Ciclismo	22°C	35°C	66% VO _{2max}	-35%
Parkin <i>et al.</i> ⁶⁸	8	TTE	Ciclismo	3°C 20°C	40°C 40°C	70% VO _{2max} 70% VO _{2max}	-64% -50%
MacDougall <i>et al.</i> ⁹¹	6	TTE	Carrera	23°C	39°C	70% VO _{2max}	-36%

Km: Kilómetros; Kj: Kilojulios; MMP: Mejor marca personal; VO_{2max}: Consumo Máximo de Oxígeno, y reducción del rendimiento (%) durante los tests. Temperatura de bulbo seco (°C) del entorno control (templado) y en condiciones de estrés térmico.

rendimiento del 3,1% y el 2,7%, en hombres y mujeres, respectivamente, cuando las pruebas se realizaron >25 °C de temperatura ambiente. Análisis estadísticos recientes muestran cómo, entre 5°C y 25°C, por cada 1°C que aumentaba la temperatura ambiente, el rendimiento de la maratón se veía perjudicado en 38 seg para los 100 mejores tiempos, y en 20 seg para el ganador de la prueba^{79,80}. Son muchos los estudios que han comparado cómo el calor afecta el rendimiento en el dominio de intensidad dura respecto a condiciones ambientales templadas, teniendo que distinguir entre protocolos autorregulados o *self-paced*^{48-50,52,53,81-90} y protocolos de intensidad fija^{54-57,68,85,91}. Los protocolos de ejercicio a intensidad fija informan sobre el tiempo hasta el agotamiento, mientras que los protocolos de ejercicio autorregulado muestran el proceso de aparición de la fatiga, basándose ambos protocolos en teorías distintas⁸⁸. Durante el ejercicio de intensidad fija se produce un aumento de la temperatura central progresivo y no autorregulado, lo cual llevará al agotamiento voluntario del ejercicio cuando los valores de temperatura central alcancen los ~40°C^{39,45,54} o los superen en caso de algunos de-

portistas de alto nivel durante la competición⁹². Sin embargo, durante el ejercicio autorregulado, el deportista regula la producción de calor metabólico evitando alcanzar demasiado pronto dicha temperatura central crítica, permitiéndole terminar la prueba (Tabla 1).

En este dominio, los factores que producen la fatiga son los mismos que en el dominio de intensidad moderada (ver Dominio de intensidad moderada). El aumento de la dependencia de los carbohidratos en condiciones de estrés térmico puede acelerar la aparición de la fatiga en este dominio, siendo la depleción de los depósitos de glucógeno muscular uno de los limitantes principales, junto con los factores centrales^{41,72,73}, del ejercicio entre LT y PC/VC⁹.

Dominio de intensidad severa

Son varios los estudios que han visto reducidos los valores de producción de potencia máxima durante las pruebas de intensidad incremental (VO_{2max}) en condiciones de estrés térmico^{58,93-101}. Nybo *et*

Tabla 2. Comparación de rendimiento en ejercicio aeróbico máximo durante test contrarreloj (TT) y tiempo hasta el agotamiento (TTE) en condiciones de calor vs. Temperatura control.

Estudio	N	Test	Ejercicio	Control	Calor	Intensidad	Rendimiento
Periard y Racinais ⁸⁶	10	TT 15 min + 1 min 30 seg máx.	Ciclismo	18°C	35°C	Autorregulada	-18%
Altareki et al. ¹⁰²	9	TT 4 km	Ciclismo	13°C	35°C	Autorregulada	-2%
Ely et al. ¹⁰³	8	TT 15 min	Ciclismo	21°C	40°C	Autorregulada	-17%
Tatterson et al. ¹⁰⁴	11	TT 30 min	Ciclismo	23°C	32°C	Autorregulada	-6%
Tucker et al. ¹⁰⁵	10	TT 20 km	Ciclismo	15°C	35°C	Autorregulada	-6%
Tyler y Sunderland ¹⁰⁶	9	TT 15 min	Carrera	14°C	30°C	Autorregulada	-10%
Marino et al. ¹⁰⁷	16	TT 8 km	Carrera	15°C	35°C	Autorregulada	-12%
Marino et al. ¹⁰⁸	12	TT 8 km	Carrera	15°C	35°C	Autorregulada	-14%
Mitchell et al. ¹⁰⁹	11	TTE	Ciclismo	11°C	37°C	80% VO _{2max}	-48%
			Ciclismo	11°C	37°C	100% VO _{2max}	-3%

Km: Kilómetros; VO_{2max}: Consumo Máximo de Oxígeno, y reducción del rendimiento (%) durante los tests. Temperatura de bulbo seco (°C) del entorno control (templado) y en condiciones de estrés térmico.

al.,⁴¹ señala cómo el VO_{2max} disminuyó en un 11% de promedio en 10 de 11 estudios analizados. Estas disminuciones del VO_{2max} se han visto también incluso en sujetos previamente aclimatados (~7%), en comparación con el VO_{2max} en temperaturas templadas (21°C)⁵⁸. Durante pruebas por tiempo o hasta el agotamiento ejecutadas principalmente por encima de la PCVC, el rendimiento también se ha visto afectado en condiciones de calor respecto a las condiciones control^{86,102-109} (Tabla 2).

Durante el ejercicio en el dominio de intensidad severa en condiciones de H, parece bastante aceptado que los mecanismos cardiovasculares son los responsables de la disminución del VO_{2max} y del rendimiento⁴¹. El ejercicio intenso se asocia con altas tasas de producción de calor endógeno, que en un entorno de estrés térmico, comprometerá la capacidad del Sistema Cardiovascular de disipar el calor al medio ambiente⁹⁴, desarrollando así una H y comprometiendo la capacidad de difundir oxígeno arterial a la musculatura que se ejercita. El efecto combinado de la disminución del volumen sanguíneo central¹¹⁰, así como un menor tiempo de llenado diastólico¹¹¹, causarán una disminución del volumen sistólico y del gasto cardíaco⁶³. Por lo tanto, el suministro de oxígeno muscular no será suficiente para las demandas de extracción de oxígeno que el ejercicio de alta intensidad requiere, así como para apoyar la termorregulación, por lo que el rendimiento se verá afectado⁴¹.

Por lo tanto, la contribución energética del metabolismo anaeróbico aumentará para mantener la intensidad del ejercicio¹¹², disminuyendo más rápidamente los niveles de ATP y PCr en los músculos, así como aumentando la acumulación de lactato en sangre y H⁺, induciendo a una fatiga periférica⁹⁴.

El aumento del trabajo de los músculos respiratorios durante el ejercicio de alta intensidad comprometerá el flujo sanguíneo hacia la musculatura del ejercicio por vasoconstricción^{113,114}, por lo que será un factor relevante en el rendimiento tanto en condiciones de normotermia como de hipertermia.

Además, la menor entrega de oxígeno al músculo y los cambios en el metabolismo muscular influirán sobre la retroalimentación aferente

inhibitoria del SNC, aumentando la sensación de fatiga de los deportistas e influyendo en el ritmo¹¹⁵, limitando el desarrollo de la fatiga periférica a un umbral crítico, probablemente para proteger al organismo de la extenuación y de cualquier posible daño¹¹⁶.

Durante el dominio de intensidad severa serán los factores periféricos y cardiovasculares los limitantes principales del rendimiento en calor, pero como hemos dicho anteriormente, la fatiga es multifactorial^{41,47} y la fatiga central también puede tener un papel importante en el rendimiento.

Dominio de intensidad extrema

Ya en 1945, Asmussen y Bøje¹¹⁷ demostraron que el rendimiento durante un esfuerzo máximo de 12-15 seg en cicloergómetro se veía beneficiado cuanto mayor era la temperatura muscular, ya fuese alcanzado mediante un calentamiento activo o pasivo. Posteriormente, otros autores han confirmado estos resultados sobre esfuerzos máximos de corta duración¹¹⁸⁻¹²¹. Sin embargo, no está claro que el rendimiento en esfuerzos de intensidad severa en condiciones de laboratorio en ambientes calurosos se vea favorecido. Dotan y Bar-Or¹²² y Backx et al.,¹²³ no encontraron diferencias significativas en el rendimiento de un test Wingate, o de varios consecutivos, entre ambientes templados y ambientes calurosos, al contrario que Ball, Burrows y Sargeant,¹²⁴. Otros trabajos han informado de rendimientos superiores en protocolos de sprints repetidos de corta duración en condiciones de estrés térmico^{125,126}. En condiciones de campo, Haida et al.,¹²⁷ y Guy et al.,⁷⁸ mediante análisis estadísticos de los resultados de los grandes campeonatos internacionales en pruebas de sprint y media distancia, encontraron que existe relación entre los mejores resultados y una mayor temperatura ambiental. Haida et al.,¹²⁷ encontró que los rendimientos en las pruebas de atletismo que comprenden los 100 m a los 1.500 m eran superiores en las pruebas que se realizaban durante la primera semana de Julio, y solían corresponderse con la celebración de eventos deportivos

importantes en el hemisferio norte donde las temperaturas medias suelen ser elevadas. Estos mejores resultados los asocian a las condiciones ambientales. Guy *et al.*,⁷⁸ analizaron las 6 mejores actuaciones en pruebas de velocidad (100-200 m) durante los Mundiales de la IAAF que comprendían 1999 y 2011, y encontraron que los atletas rendían un ~2% mejor en condiciones de calor que en condiciones templadas.

En la actualidad, se desconocen exactamente los mecanismos encargados de provocar esta mejora del rendimiento durante los esfuerzos máximos de corta duración en condiciones de calor, aunque hay algunas teorías. Asmussen *et al.*,¹¹⁷ atribuían esta mejora del rendimiento a que el aumento de la temperatura muscular facilitaría una mayor tasa de formación de puentes cruzados. Gray *et al.*,¹²⁰ proponen una tasa más rápida de utilización de la fosfocreatina (PCr), así como una mayor velocidad en la conducción de las fibras musculares. Para un conocimiento mayor sobre los mecanismos del calor sobre el rendimiento en sprint, revisar Girard, Brocherie y Bishop¹²⁸.

Conclusión

En esta revisión, se ha descrito cómo el estrés térmico influye en el rendimiento en los distintos dominios descritos de intensidad-duración, así como los mecanismos fisiológicos que producen dichas variaciones. Los análisis de resultados en competición demuestran cómo el calor influye sobre el rendimiento de intensidad moderada, siendo complicado separar los efectos del calor de los de la deshidratación. Existe mucha evidencia sobre cómo el calor perjudica el rendimiento durante los ejercicios de intensidad dura y severa, tanto en condiciones de laboratorio como durante la competición. Sin embargo, en el dominio de intensidad extrema, las condiciones de calor parecen ser más favorables para desarrollar potencias o velocidades superiores que en un ambiente templado o frío. En los ejercicios submáximos (dominios moderado y duro), los factores centrales y la dependencia del glucógeno muscular parecen ser los limitantes principales del rendimiento en condiciones templadas, y estos mecanismos se verán más afectados conforme mayor sea el estrés térmico, acelerando así la aparición de la fatiga. Durante los ejercicios máximos (dominio severo) en condiciones de hipertermia, serán los factores cardiovasculares y periféricos los que no puedan sostener la intensidad y limiten el rendimiento. El ejercicio supramáximo (dominio extremo) verá beneficiado su rendimiento debido a factores centrales y de disponibilidad energética mejorados por el calor. Es difícil hablar de mecanismos fisiológicos aislados que determinen el rendimiento en cada dominio de intensidad-duración. Hablamos de mecanismos que influyen principalmente en el rendimiento de cada uno de ellos, pero debe tenerse en cuenta que son muchos los factores que se interrelacionan entre sí para favorecer el proceso de la fatiga, y no uno solo. Esta revisión demuestra que pruebas que van desde los 3-4 min de duración hasta por encima de las 3h pueden beneficiarse de estrategias de enfriamiento pre y durante la competición en condiciones de calor, mientras que en pruebas <2 min el enfriamiento puede comprometer el rendimiento.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflicto de interés alguno.

Bibliografía

1. Bompa T. *Theory and methodology of training*. Kendall/Hunt, editor. New York; 1983.
2. Gastin P. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sport Med*. 2001;31:725-41.
3. Grosser M, Brüggemann P, Zintl F. *Alto rendimiento deportivo. Planificación y desarrollo*. Martínez Roca, editor. España; 1989.
4. Zintl F. *Entrenamiento de la resistencia*. Martínez Roca, editor. Barcelona; 1991.
5. Chidnok W, Dimenna FJ, Bailey SJ, Vanhatalo A, Morton RH, Wilkerson DP, *et al*. Exercise tolerance in intermittent cycling: Application of the critical power concept. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44:966-76.
6. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: The physiology of champions. *J Physiol*. 2008;586:35-44.
7. Sanders D, Heijboer M. The anaerobic power reserve and its applicability in professional road cycling. *J Sports Sci*. 2019;37:621-9.
8. Skinner JS, McLellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport*. 1980;51:234-48.
9. Burnley M, Jones AM. Power-duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *Eur J Sport Sci*. 2018;18:1-12.
10. Poole DC, Burnley M, Vanhatalo A, Rossiter HB, Jones AM. Critical power: An important fatigue threshold in exercise physiology. Vol. 48, *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2016. 2320-2334 p.
11. Davies CTM, Thompson MW. Physiological responses to prolonged exercise in ultra-marathon athletes. *J Appl Physiol*. 1986;61:611-7.
12. Gandevia SC, Allen GM, McKenzie DK. Central fatigue. Critical issues, quantification and practical implications. *Adv Exp Med Biol*. 1995;384:281-94.
13. Martin V, Kerhervé H, Messonnier LA, Banfi JC, Geysant A, Bonnefoy R, *et al*. Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. *J Appl Physiol*. 2010;108:1224-33.
14. Temesi J, Rupp T, Martin V, Arnal PJ, Féasson L, Verges S, *et al*. Central fatigue assessed by transcranial magnetic stimulation in ultratrail running. *Med Sci Sports Exerc*. 2014;46:1166-75.
15. Lepers R, Maffiuletti NA, Rochette L, Brugniaux J, Millet GY. Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *J Appl Physiol*. 2002;92:1487-93.
16. Gollnick PD, Piehl K, Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *J Physiol*. 1974;45-57.
17. Bosch AN, Dennis SC, Noakes TD. Influence of carbohydrate ingestion on fuel substrate turnover and oxidation during prolonged exercise. *J Appl Physiol*. 1994;76:2364-72.
18. Moyon NE, Gano MS, Wiersma LD, Kavouras SA, Gray M, McDermott B, *et al*. Hydration status affects mood state and pain sensation during ultra-endurance cycling. *J Sports Sci*. 2015;33:1962-9.
19. Hoffman MD, Stellingwerff T, Costa RJS. Considerations for ultra-endurance activities: part 2-hydration. *Res Sport Med*. 2019;27:182-94.
20. Jones AM, Vanhatalo A. The 'Critical Power' concept: Applications to sports performance with a focus on intermittent high-intensity exercise. *Sport Med*. 2017;47:65-78.
21. Jones AM, Burnley M, Black MI, Poole DC, Vanhatalo A. The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard'. *Physiol Rep*. 2019;7:1-16.
22. Keir DA, Pogliaghi S, Murias JM. The respiratory compensation point and the deoxygenation break point are valid surrogates for critical power and maximum lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50:2375-8.
23. Keir DA, Paterson DH, Kowalchuk JM, Murias JM, Graham T. Using ramp-incremental VO₂ responses for constant-intensity exercise selection. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2018;892:882-92.
24. Deckerle J, Baron B, Dupont L, Vanvelcenaher J, Pelayo P. Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89:281-8.
25. Deckerle J, Pelayo P, Clipet B, Depretz S, Lefevre T, Sidney M. Critical swimming speed does not represent the speed at maximal lactate steady state. *Int J Sports Med*. 2005;26:524-30.
26. Mattioni Maturana F, Keir DA, McLay K, Murias JM. Can measures of critical power precisely estimate the maximal metabolic steady-state? *Appl Physiol Nutr Metab*. 2016;41:1197-1203.
27. Broxterman RM, Craig JC, Richardson RS. The respiratory compensation point and the deoxygenation break point are not valid surrogates for critical power and maximum lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50:2379-82.
28. Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Ivy JL. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J Appl Physiol*. 1986;61:165-72.

29. Jones AM, Wilkerson DP, DiMenna F, Fulford J, Poole DC. Muscle metabolic responses to exercise above and below the "critical power" assessed using 31P-MRS. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol*. 2008;294:585–94.
30. Krstrup P, Söderlund K, Mohr M, Bangsbo J. The slow component of oxygen uptake during intense, sub-maximal exercise in man is associated with additional fibre recruitment. *Pflugers Arch Eur J Physiol*. 2004;447:855–66.
31. Burnley M, Vanhatalo A, Jones AM. Distinct profiles of neuromuscular fatigue during muscle contractions below and above the critical torque in humans. *J Appl Physiol*. 2012;113:215–23.
32. Pallarés JG, Lillo-Bevia JR, Morán-Navarro R, Cerezuela-Espejo V, Mora-Rodríguez R. Time to exhaustion during cycling is not well predicted by critical power calculations. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2020;45:753–60.
33. Chidnok W, Dimenna FJ, Bailey SJ, Wilkerson DP, Vanhatalo A, Jones AM. Effects of pacing strategy on work done above critical power during high-intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45:1377–85.
34. Chidnok W, Fulford J, Bailey SJ, Dimenna FJ, Skiba PF, Vanhatalo A, et al. Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: Relationship to the "critical power. *J Appl Physiol*. 2013;115:243–50.
35. Poole DC, Ward S, Gardner G, Whipp B. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*. 1988;31:1265–79.
36. Taylor BJ, Romer LM. Effect of expiratory muscle fatigue on exercise tolerance and locomotor muscle fatigue in healthy humans. *J Appl Physiol*. 2008;104:1442–51.
37. Romer LM, Polkey MI. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: Implications for performance. *J Appl Physiol*. 2008;104:879–88.
38. Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D. Repeated-Sprint Ability – Part I. *Sport Med*. 2011;41:673–94.
39. González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol*. 1999;86:1032–9.
40. Calleja-González J, Leibar X, Arratibel I, Erauzkin J, Terrados N. Hyperthermia in top level athletes during competition. *Arch Med Del Deport*. 2009;355–9.
41. Nybo L, Rasmussen P, Sawka MN. Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. *Compr Physiol*. 2014;4:657–89.
42. Brotherhood JR. Heat stress and strain in exercise and sport. *J Sci Med Sport*. 2008;11:6–19.
43. González-alonso J, Crandall CG, Johnson JM. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol*. 2008;586:45–53.
44. Nybo L. Hyperthermia and fatigue. *J Appl Physiol*. 2008;104:871–8.
45. Nybo L, Nielsen B. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol*. 2001;91:1055–60.
46. Sawka MN, Leon LR, Montain SJ, Sonna LA. Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. *Compr Physiol*. 2011;1:1883–928.
47. Cheung SS, Sleivert GG. Multiple triggers for hyperthermic fatigue and exhaustion. *Exerc Sport Sci Rev*. 2004;32:100–6.
48. Peiffer JJ, Abbiss CR. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform*. 2011;6:208–20.
49. Périard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp Physiol*. 2011;96:134–44.
50. Lorenzo S, Minson CT, Babb TG, Halliwill JR. Lactate threshold predicting time-trial performance: Impact of heat and acclimation. *J Appl Physiol*. 2011;111:221–7.
51. Levels K, de Koning J, Broekhuizen I, Zwaan T, Foster C, Daanen H. Effects of radiant heat exposure on pacing pattern during a 15-km cycling time trial. *J Sports Sci*. 2014;32:845–52.
52. Racinais S, Périard JD, Karlsen A, Nybo L. Effect of heat and heat acclimatization on cycling time trial performance and pacing. *Med Sci Sports Exerc*. 2014;47:601–6.
53. Périard JD, Racinais S. Performance and pacing during cycle exercise in hyperthermic and hypoxic conditions. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48:845–53.
54. Galloway SDR, Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1997. 29:1240–9.
55. Ftaiti F, Kacem A, Jaidane N, Tabka Z, Dogui M. Changes in EEG activity before and after exhaustive exercise in sedentary women in neutral and hot environments. **Appl Ergon**. 2010;41:806–11.
56. Rowland T, Garrison A, Pober D. Determinants of endurance exercise capacity in the heat in prepubertal boys. *Int J Sports Med*. 2007;28:26–32.
57. Girard O, Racinais S. Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *Eur J Appl Physiol*. 2014;114:1521–32.
58. Sawka MN, Young AJ, Cadarette BS, Levine L, Pandolf KB. Influence of heat stress and acclimation on maximal aerobic power. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985;53:294–8.
59. Febbraio M, Snow R, Hargreaves M, Stathis C, Martin I, Carey F. Muscle metab in trained me exercise in a climation tress. *J Appl Physiol*. 1994;76:589–97.
60. Parise CA, Hoffman MD. Influence of temperature and performance level on pacing a 161 km trail ultramarathon. *Int J Sports Physiol Perform*. 2011;6:243–51.
61. Ely MR, Chevront SN, Roberts WO, Montain SJ. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39:487–93.
62. Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol*. 2010;54:297–306.
63. González-Alonso J, Mora-Rodríguez R, Coyle EF. Stroke volume during exercise: Interaction of environment and hydration. *Am J Physiol - Hear Circ Physiol*. 2000;278:321–30.
64. Savard GK, Nielsen B, Laszczynska J, Larsen BE, Saltin B. Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress. *J Appl Physiol*. 1988;64:649–57.
65. Nielsen B, Savard G, Richter EA, Hargreaves M, Saltin B. Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress. *J Appl Physiol*. 1990;69:1040–6.
66. Fink WJ, Costill DL, Van Handel PJ. Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1975;34:183–90.
67. Young AJ, Sawka MN, Levine L, Cadarette BS, Pandolf KB. Skeletal muscle metabolism during exercise is influenced by heat acclimation. *J Appl Physiol*. 1985;59:1929–35.
68. Parkin JM, Carey MF, Zhao S, Febbraio MA. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. *J Appl Physiol*. 1999;86:902–8.
69. Cheung SS. Hyperthermia and voluntary exhaustion: Integrating models and future challenges. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2007;32:808–17.
70. Gonzalez-Alonso J, Calbet JA, Nielsen B. Metabolic and thermodynamic responses to dehydration-induced reductions in muscle blood flow in exercising humans. *J Physiol*. 1999;577–89.
71. White MD. Components and mechanisms of thermal hyperpnea. *J Appl Physiol*. 2006;101:655–63.
72. Nybo L, Secher NH. Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. *Prog Neurobiol*. 2004;72:223–61.
73. Rasmussen P, Nybo L, Volianitis S, Møller K, Secher NH, Gjedde A. Cerebral oxygenation is reduced during hyperthermic exercise in humans. *Acta Physiol*. 2010;199:63–70.
74. Nielsen B, Hyldig T, Bidstrup F, González-Alonso J, Christoffersen GRJ. Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers Arch Eur J Physiol*. 2001;442:41–8.
75. Schlader ZJ, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T. Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*. 2011;111:1631–9.
76. Jeukendrup AE, Vet-Joop K, Sturk A, Stegen JHJC, Senden J, Saris WHM, et al. Relationship between gastro-intestinal complaints and endotoxaemia, cytokine release and the acute-phase reaction during and after a long-distance triathlon in highly trained men. *Clin Sci*. 2000;98:47–55.
77. Neuffer PD, Young AJ, Sawka MN. Gastric emptying during exercise: effects of heat stress and hypohydration. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1989;58:433–9.
78. Guy JH, Deakin GB, Edwards AM, Miller CM, Pyne DB. Adaptation to hot environmental conditions: An exploration of the performance basis, procedures and future directions to optimise opportunities for elite athletes. *Sport Med*. 2015;45:303–11.
79. Knechtle B, Gangi S Di, Rust CA, Villiger E, Rosemann T, Nikolaidis PT. The role of weather conditions on running performance in the boston marathon from 1972 to 2018. *PLoS One*. 2019;14:1–16.
80. Nikolaidis PT, Di Gangi S, Chtourou H, Rüst CA, Rosemann T, Knechtle B. The role of environmental conditions on marathon running performance in men competing in boston marathon from 1897 to 2018. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16.
81. Roelands B, Hasegawa H, Watson P, Piacentini MF, Buyse L, De Schutter G, et al. The effects of acute dopamine reuptake inhibition on performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40:879–85.
82. Roelands B, Goekint M, Buyse L, Pauwels F, De Schutter G, Piacentini F, et al. Time trial performance in normal and high ambient temperature: Is there a role for 5-HT7. *Eur J Appl Physiol*. 2009;107:119–26.
83. Watson P, Hasegawa H, Roelands B, Piacentini MF, Looover R, Meeusen R. Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions. *J Physiol*. 2005;565:873–83.
84. Suping Z, Guanglin M, Yanwen W, Ji L. Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. *Int J Biometeorol*. 1992;36:63–8.
85. De Paula Viveiros J, Amorim FT, Alves MNM, Passos RLF, Meyer F. Run performance of middle-aged and young adult runners in the heat. *Int J Sports Med*. 2012;33:211–7.

86. Périard JD, Racinais S. Self-paced exercise in hot and cool conditions is associated with the maintenance of %VO₂peak within a narrow range. *J Appl Physiol*. 2015;118:1258–65.
87. Keiser S, Flück D, Hüppin F, Stravs A, Hilty MP, Lundby C. Heat training increases exercise capacity in hot but not in temperate conditions: A mechanistic counter-balanced cross-over study. *Am J Physiol - Hear Circ Physiol*. 2015;309:H750–61.
88. Schlader ZJ, Stannard SR, Mündel T. Is peak oxygen uptake a determinant of moderate duration self-paced exercise performance in the heat? *Appl Physiol Nutr Metab*. 2011;36:863–72.
89. Romer LM, Bridge MW, McConnell AK, Jones DA. Influence of environmental temperature on exercise-induced inspiratory muscle fatigue. *Eur J Appl Physiol*. 2004;91:656–63.
90. VanHaitsma TA, Light AR, Light KC, Huguen RW, Yenchik S, White AT. Fatigue sensation and gene expression in trained cyclists following a 40 km time trial in the heat. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116:541–52.
91. MacDougall JD, Reddan WG, Layton CR, Dempsey JA. Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J Appl Physiol*. 1974;36:538–44.
92. Maron MB, Wagner JA, Horvath SM. Thermoregulatory responses during competitive marathon running. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1977;42:909–14.
93. Arngrímsson SÁ, Stewart DJ, Borrani F, Skinner KA, Cureton KJ. Relation of heart rate to percent VO₂ peak during submaximal exercise in the heat. *J Appl Physiol*. 2003;94:1162–8.
94. González-Alonso J, Calbet JAL. Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*. 2003;107:824–30.
95. Klausen K, Dill DB, Phillips EE, McGregor D. Metabolic reactions to work in the desert. *J Appl Physiol*. 1967;22:292–6.
96. Lafrenz AJ, Wingo JE, Ganio MS, Cureton KJ. Effect of ambient temperature on cardiovascular drift and maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40:1065–71.
97. Lorenzo S, Halliwill JR, Sawka MN, Minson CT. Heat acclimation improves exercise performance. *J Appl Physiol*. 2010;109:1140–7.
98. Nybo L, Jensen T, Nielsen B, González-Alonso J. Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO₂ kinetics during intense exercise. *J Appl Physiol*. 2001;90:1057–64.
99. Pirnay F, Deroanne R, Petit JM. Maximal oxygen consumption in a hot environment. *J Appl Physiol*. 1970;28:642–5.
100. Rowell LB, Brengelmann GL, Murray JA, Kraning KK, Kusumi F. Human metabolic responses to hyperthermia during mild to maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1969;26:395–402.
101. Wingo JE, Lafrenz AJ, Ganio MS, Edwards GL, Cureton KJ. Cardiovascular drift is related to reduced maximal oxygen uptake during heat stress. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:248–55.
102. Altareki N, Drust B, Atkinson G, Cable T, Gregson W. Effects of environmental heat stress (35°C) with simulated air movement on the thermoregulatory responses during a 4-km cycling time trial. *Int J Sports Med*. 2009;30:9–15.
103. Ely BR, Chevront SN, Kenefick RW, Sawka MN. Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42:135–41.
104. Tattersson AJ, Hahn AG, Martin DT, Febbraio MA, Movement H. Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists. *J Sci Med Sport*. 2000;3:186–93.
105. Tucker R, Rauch L, Harley YX, Noakes TD. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Arch Eur J Physiol*. 2004;448:422–30.
106. Tyler C, Sunderland C. The effect of ambient temperature on the reliability of a pre-loaded treadmill time-trial. *Int J Sports Med*. 2008;29:812–6.
107. Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI, Noakes TD, et al. Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Arch Eur J Physiol*. 2000;441:359–67.
108. Marino FE, Lambert MI, Noakes TD. Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol*. 2004;96:124–30.
109. Mitchell JB, Rogers MM, Basset JT, Hubing KA. Fatigue during high-intensity endurance exercise: the interaction between metabolic factors and thermal stress. *J Strength Cond Res*. 2014;28:1906–14.
110. Rowell LB, Marx HJ, Bruce RA, Conn RD, Kusumi F. Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J Clin Invest*. 1966;45:1801–16.
111. Fritzsche RG, Switzer TW, Hodgkinson BJ, Coyle EF. Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate. *J Appl Physiol*. 1999;86:799–805.
112. Dimri GP, Malhotra MS, Sen Gupta J, Sampath Kumar T, Arora BS. Alterations in aerobic-anaerobic proportions of metabolism during work in heat. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1980;45:43–50.
113. Harms CA, Babcock MA, McClaran SR, Pegelow DF, Nickle GA, Nelson WB, et al. Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1997;82:1573–83.
114. Harms CA, Wetter TJ, McClaran SR, Pegelow DF, Nickle GA, Nelson WB, et al. Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J Appl Physiol*. 1998;85:609–18.
115. Amann M. Central and peripheral fatigue: Interaction during cycling exercise in humans. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43:2039–45.
116. Amann M. Significance of Group III and IV muscle afferents for the endurance exercising human. *Clin Exp Pharmacol Physiol*. 2012;39:831–5.
117. Asmussen E, Bøje O. Body temperature and capacity for work. *Acta Physiol Scand*. 1945;10:1–22.
118. Sargeant AJ. Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1987;56:693–8.
119. Linnane DM, Bracken RM, Brooks S, Cox VM, Ball D. Effects of hyperthermia on the metabolic responses to repeated high-intensity exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2004;93:159–66.
120. Gray SR, De Vito G, Nimmo MA, Farina D, Ferguson RA. Skeletal muscle ATP turnover and muscle fiber conduction velocity are elevated at higher muscle temperatures during maximal power output development in humans. *Am J Physiol - Regul Integr Comp Physiol*. 2006;290:376–83.
121. Yaicharoen P, Wallman K, Bishop D, Morton A. The effect of warm up on single and intermittent-sprint performance. *J Sports Sci*. 2012;30:833–40.
122. Dotan R, Bar-Or O. Climatic heat stress and performance in the Wingate Anaerobic Test. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1980;44:237–43.
123. Backx K, Mc Naughton L, Crickmore L, Palmer G, Carlisle A. Effects of differing heat and humidity on the performance and recovery from multiple high intensity, intermittent exercise bouts. *Int J Sports Med*. 2000;21:400–5.
124. Ball D, Burrows C, Sargeant AJ. Human power output during repeated sprint cycle exercise: The influence of thermal stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1999;79:360–6.
125. Falk B, Radom-Isaac S, Hoffmann JR, Wang Y, Yarom Y, Magazanik A, et al. The effect of heat exposure on performance of and recovery from high-intensity, intermittent exercise. *Int J Sports Med*. 1998;19:1–6.
126. Girard O, Bishop DJ, Racinais S. Hot conditions improve power output during repeated cycling sprints without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *Eur J Appl Physiol*. 2013;113:359–69.
127. Haïda A, Dor F, Guillaume M, Quinquis L, Marc A, Marquet LA, et al. Environment and scheduling effects on sprint and middle distance running performances. *PLoS One*. 2013;8:1–7.
128. Girard O, Brocherie F, Bishop DJ. Sprint performance under heat stress: A review. *Scand J Med Sci Sport*. 2015;25:79–89.