

Monograph

Fisiología del Mountain Bike

Franco M Impellizzeri¹ y Samuele M Marcora²¹Human Performance Laboratory, MAPEI Sport Research Center, Castellanza (VA), Italia.²School of Sport, Health and Exercise Sciences, University of Wales, Bangor, Reino Unido.

RESUMEN

El *mountain bike* o ciclismo de montaña es una actividad recreativa popular que se realiza al aire libre y un deporte olímpico. Las carreras de circuito de *cross country* tienen un tiempo de realización de aproximadamente 120 minutos y se corren a una frecuencia cardíaca media cercana al 90% de la máxima, lo que corresponde a 84% del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}). Más del 80% del tiempo de la carrera transcurre por encima del umbral de lactato. Esta elevada intensidad de ejercicio está relacionada con la fase de inicio rápida de la carrera; las numerosas subidas que fuerzan a los ciclistas de montaña a destinar la mayor parte de su esfuerzo a ir contra la gravedad; la mayor resistencia al rodamiento; y las contracciones isométricas de los músculos de los brazos y piernas necesarias para el manejo y estabilización de la bicicleta. Debido a la elevada producción de potencia (por encima de 500W) que se requiere durante el ascenso empinado y durante la largada de la carrera, es probable que el metabolismo de energía anaeróbica también sea un factor en el *mountain bike* y debe ser investigado en detalle. Las características fisiológicas de los ciclistas de montaña indican que la potencia aeróbica ($VO_{2max} > 70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) y la capacidad de mantener elevadas tasas de trabajo durante períodos prolongados de tiempo, son requisitos previos para competir en un nivel alto en los eventos de *mountain bike*. Las características antropométricas de los ciclistas de montaña son similares a las de los ciclistas de ruta escaladores y de los ciclistas de ruta que rinden bien en todos los terrenos. Diferentes parámetros de la aptitud física aeróbica se correlacionan con el rendimiento de *cross country*, lo que sugiere que estas pruebas son válidas para la valoración fisiológica de ciclistas de montaña, sobre todo cuando se normalizan en función de la masa corporal. Los factores distintos a la potencia y capacidad aeróbica pueden influir en el rendimiento del *mountain bike* y requieren investigaciones adicionales. Entre éstos se incluye la economía, potencia y capacidad anaeróbica, habilidad técnica y las estrategias nutricionales previas al ejercicio.

Palabras Clave: ciclismo de montaña, umbral, producción de potencia, VO_2 máx, factores limitantes

INTRODUCCIÓN

El ciclismo de montaña moderno surgió en EE.UU en los años setenta y en la actualidad es una de las actividades recreativas que se realizan al aire libre más populares del mundo. A pesar de haber disminuido un poco en los últimos 5 años, las bicicletas de montaña representan todavía cerca de un tercio de todas las bicicletas vendidas cada año en EE.UU y Europa. [1,2] Las competencias oficiales empezaron a comienzos de 1980 y la Unión Ciclista Internacional (UCI) ahora identifica tres tipos de eventos con bicicleta de montaña: competiciones de *cross country*, carreras en descenso y competiciones en etapas [3]. El primer Campeonato Mundial fue organizado por la UCI en 1990 y la primera Copa del Mundo fue establecida al año siguiente. [4] La competición en un circuito de *cross country* (ahora llamada competición de *cross country* olímpica por la UCI) es el evento de competición de ciclismo de montaña más popular y fue incluido como deporte olímpico oficial en los Juegos Olímpicos de Verano Atlanta en 1996. Durante una temporada de competencia completa, hay varias competencias diferentes al Campeonato Mundial y a la Copa del Mundo (clasificadas como categoría CM y WC por la UCI, respectivamente): los campeonatos continentales (Cat, C.C.P.), carreras en etapas (Cat. SHC, SI y S2)

y carreras de 1 día (Cat. HC, Cl, C2 y C3). Este calendario de carreras permite a los ciclistas de montaña competir una vez por semana durante 9 meses por año.

En los últimos años, el ciclismo de montaña de competición ha captado el interés de los científicos del deporte y se ha publicado un número pequeño pero creciente de estudios fisiológicos. El objetivo de esta revisión es aportar una síntesis de esta literatura y algunas recomendaciones para las futuras investigaciones. Recientemente se publicó un trabajo de revisión excelente sobre el costo energético de practicar ciclismo con sistemas de absorción de impacto, [5] por lo que esta área de investigación no será abordada en esta publicación. En la literatura, los términos "ciclistas de montaña o *mountain bike*" y "ciclistas *off-road*" se utilizan normalmente y de modo intercambiable y en este trabajo se utilizarán para hacer referencia a ciclistas de la especialidad *cross country*, a menos que se especifique otra cosa.

DEMANDAS FISIOLÓGICAS DE COMPETENCIAS DE CROSS COUNTRY

Características de las Competiciones

Una competición de *cross country* en circuito constituye una prueba de resistencia de salida en masa que consiste en realizar varias vueltas de un circuito de *mountain bike*. Según las reglas de la UCI [3] el recorrido debe incluir rutas y huellas en el bosque, caminos en el campo, terrenos pedregosos o en tierra, e involucra cantidades significativas de ascensos y descensos. Típicamente, el recorrido está entre 6 km y 9 km, con una altura media de ascenso de aproximadamente 1500 m (en la Figura 1 se muestra un ejemplo de un perfil de recorrido). La UCI sugiere un número diferente de vueltas que permitirían alcanzar un tiempo de triunfo de 120-135 minutos para los hombres y 105-120 minutos para las mujeres. El orden de la largada se define según el sistema de puntos de UCI (durante los eventos internacionales) y/o el sistema nacional de puntos para las carreras nacionales. Esta regla les permite a los mejores ciclistas comenzar al frente para evitar que su velocidad sea demorada por los corredores estándar más lentos. Contrariamente al ciclismo de ruta, durante la carrera, los ciclistas de *mountain bike* no pueden recibir ayuda técnica. Por esta razón, a veces los problemas mecánicos pueden causar retrasos que afectarán negativamente e irremediablemente el rendimiento.

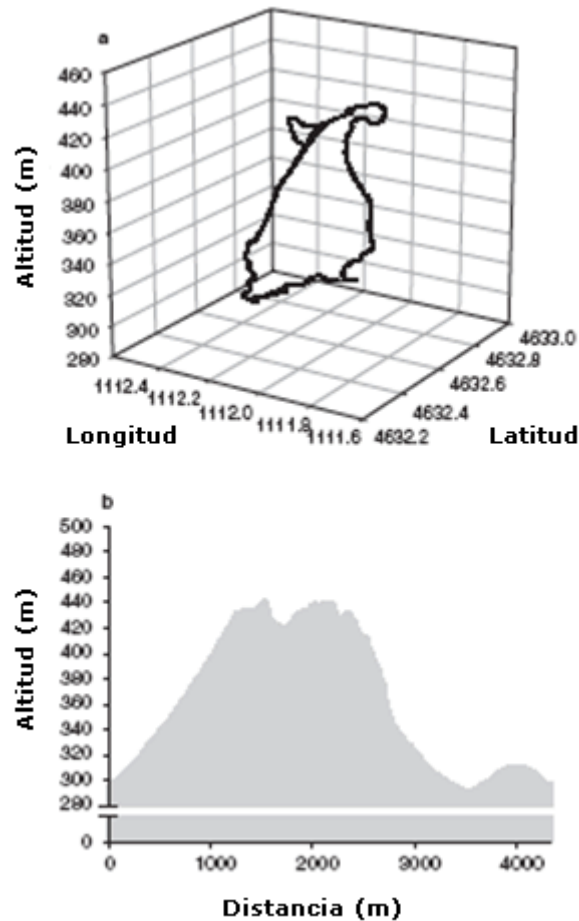


Figura 1. Ejemplo de un perfil de recorrido de una carrera de circuito a cross country olímpica. a) Representación tridimensional; b) Representación bidimensional.

Perfil de Intensidad del Ejercicio

Hasta la fecha, sólo dos estudios han descrito el perfil de intensidad del ejercicio de las competencias de *cross country* en circuito. En el primero de estos estudios, nosotros utilizamos la frecuencia cardíaca (HR) para cuantificar la intensidad del ejercicio durante cuatro carreras internacionales (altitud media de ascenso a 1430 m y tiempo medio de competencia de 147 minutos) en un grupo de ciclistas de montaña de *cross country* de alto nivel [6]. La intensidad del ejercicio fue clasificada en tres zonas diferentes basadas en la HR que correspondía a dos umbrales del lactato diferentes (LT) determinados en test de ejercicio incremental realizados en el laboratorio. El primero fue el LT definido como la intensidad que produjo un aumento de 1 mmol/L en la concentración de lactato sanguíneo, por encima del valor promedio medido durante el ejercicio entre 40% y 60% del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}). El segundo umbral fue el que correspondía a la concentración de lactato sanguíneo de 4 mmol/L (valor también conocido como comienzo de acumulación de lactato en sangre [OBLA]). Este análisis (Figura 2) reveló que la intensidad del ejercicio durante las competencias de *cross country* es alta, con un 82% del tiempo total de la carrera transcurrido por encima del LT. La HR media durante las competencias fue 90% del máximo, lo que correspondió al 84% del VO_{2max} medido en el laboratorio. Stapelfeldt et al. [7] confirmaron y ampliaron nuestros resultados midiendo la frecuencia cardíaca (HR) y la producción de potencia a lo largo de 15 carreras. Durante las carreras, la HR media fue 91% de la máxima y la producción de potencia media fue 246 W o 3,5 W/kg. Además, Stapelfeldt et al. [7] observaron grandes oscilaciones en la producción de potencia (69% de coeficiente de variación), lo que indica que las competencias de *cross country* son actividades de alta intensidad caracterizadas por un esfuerzo intermitente. Los autores analizaron la intensidad del ejercicio utilizando las producciones de potencia que correspondían al umbral aeróbico (AT) y al umbral aeróbico individual (IAT). El AT fue definido como la menor relación lactato/ VO_2 , mientras que el umbral aeróbico individual (IAT) se estableció como 1,5 mmol/L por encima del AT. Usando este método, Stapelfeldt et al. [7] observaron que 39% del tiempo total de carrera transcurría en producciones de potencia por debajo de AT, 19% entre AT e IAT, 20% entre IAT y la producción de potencia máxima medida durante un test de ejercicio

incremental, y 22% por encima de este nivel. A pesar de las diferencias de tiempo transcurrido en las diferentes zonas de intensidad (probablemente como resultado de los diferentes métodos para cuantificar la intensidad del ejercicio), ambos estudios sugirieron que las competiciones de *cross country* requieren mayores tasas de producción aeróbica de energía.

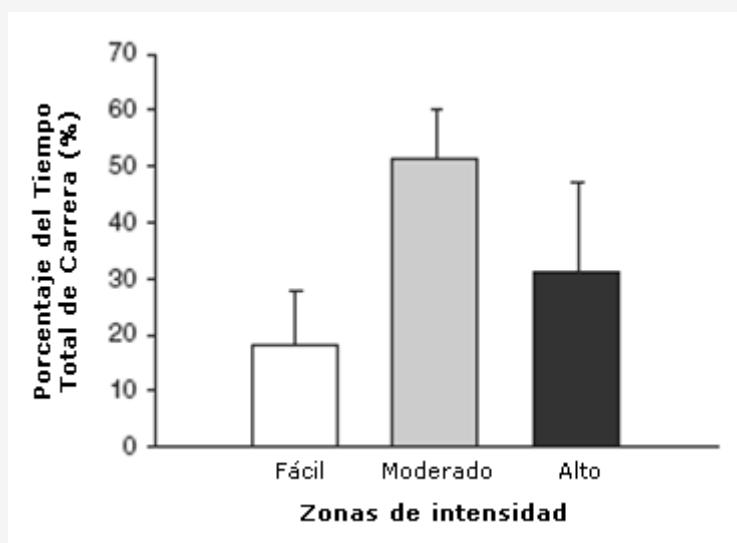


Figura 2. Porcentaje del tiempo total de carrera (147 minutos) transcurrido a una intensidad del ejercicio (frecuencia cardíaca) debajo del umbral del lactato (LT) [fácil], entre LT y el comienzo de la acumulación de lactato en sangre (OBLA) [moderado] y por encima de OBLA (alto). Basado en los datos de Impellizzeri et al.

Factores que Afectan la Intensidad del Ejercicio en el Mountain Bike

Cuando se comparan las competiciones de *cross country* con las competencias de ciclismo de ruta [8, 12] queda claro que la intensidad del ejercicio es mayor en el *mountain bike*, a excepción de los ciclistas de ruta profesionales muy motivados durante pruebas contrarreloj [10]. Esta diferencia podría ser explicada sencillamente por la mayor duración de las carreras de ruta en etapas (4-6 horas) y las tácticas de los ciclistas para enfrentar esto [13,14]. Además, aunque durante las competencias de ruta es posible reducir el gasto de energía pedaleando detrás de otro corredor [15], las situaciones en que el *drafting* es útil (el ciclismo a velocidad elevada y de grupo) durante las competencias de *mountain bike* son menos frecuentes. Otros factores también podrían contribuir con la mayor intensidad de ejercicio típica del *mountain bike*. Por ejemplo, las subidas y descensos repetidos en las rutas pedregosas y senderos por el campo que caracterizan a las competencias de *cross country* y la mayor masa de las bicicletas de montaña, podrían explicar en parte algunas de las diferencias en la intensidad del ejercicio en comparación con el ciclismo de ruta [16]. Sobre la base de una estimación del costo energético de pedalear en una superficie llana, Berry et al. [16] demostraron un VO_2 significativamente más alto (7-20 mL.kg⁻¹.min⁻¹), mientras pedaleaban en una condición de terreno difícil simulada en las instalaciones de un laboratorio colocando un montículo de 3,8 cm de altura en la banda de la cinta rodante. Dado que la diferencia en la resistencia de rodamiento como resultado del uso de ruedas rugosas y más anchas (1-2 mL.kg⁻¹.min⁻¹), los autores sugirieron que la mayor parte del aumento en el costo de energía estaba provocada por una mayor resistencia al rodamiento asociada con las condiciones de terreno difíciles simuladas. Sin embargo, este hallazgo importante debe ser confirmado por un estudio controlado adecuadamente.

El mayor gasto de energía también podría ser provocado por las contracciones isométricas intensas y repetidas de los músculos de brazos y piernas necesarias para absorber el impacto y las vibraciones causadas por las condiciones de terreno difíciles, y por manejar y estabilizar la bicicleta en el *mountain bike* [17]. Las contracciones musculares isométricas también pueden aumentar la respuesta de la HR al ciclismo de intensidad submáxima sin ningún cambio en el gasto de energía [18] y podría explicar, por lo menos en parte, la mayor HR media observada durante el *mountain bike* que durante ciclismo de ruta. Sin embargo, el uso de bicicletas con suspensión delantera similar a las utilizadas por la mayoría de los ciclistas de *mountain bike* de competición, reduce la HR media cuando se realiza ciclismo en una pista llana, con rulos, con montículos fabricados, en comparación con las bicicletas rígidas, aunque no se observó diferencias en el VO_2 entre las dos condiciones [19]. Además, el efecto de las contracciones musculares isométricas sobre la HR es menos evidente en los ejercicios de alta intensidad típicos de las carreras de *cross country* [18]. Más estudios son necesarios para aclarar la influencia de contracciones isométricas sobre la respuesta fisiológica al ciclismo de *mountain bike* e investigar el potencial

efecto positivo del entrenamiento de la fuerza de los músculos del brazo y de las piernas sobre el rendimiento.

Otro factor que puede explicar parcialmente el perfil de ejercicio de alta intensidad de las competencias de ciclismo *mountain bike* podría ser la disociación entre HR y producción de potencia durante los descensos. De hecho, Stapelfeldt et al. [7] observaron grandes oscilaciones en la producción de potencia durante la carrera mientras la HR seguía siendo relativamente constante. En particular, la HR parece disminuir en menor grado comparada con la producción de potencia durante los descensos.

Ritmo

Aunque un ritmo uniforme parecería ser más ventajoso para las pruebas contrarreloj en ciclismo [20, 22] durante las competencias de *cross country* generalmente se utiliza una estrategia diferente. De hecho, tanto Impellizzeri et al. [6] como Stapelfeldt et al. [7] midieron una HR cercana a la máxima poco después de la largada de la carrera. Esto no es sorprendente, ya que la fase inicial de competencias a *cross country*, a diferencia de las carreras de ruta en etapas, es crucial para el rendimiento global. Los ciclistas de montaña intentan desde la salida ubicarse en las posiciones delanteras para evitar reducir la velocidad cuando el recorrido se vuelve angosto con una sola pista y el traspaso se vuelve difícil. Después de esta fase inicial de intensidad muy alta, la HR tiende a disminuir en paralelo con un incremento en el tiempo para completar una vuelta. [6, 23]. La disminución en la intensidad del ejercicio durante una competencia de ciclismo *mountain bike* simulada [tres vueltas de 10 millas (16 km) en el calor] también fue demostrada por Wingo et al. [23] utilizando las mediciones del lactato sanguíneo. Los autores midieron valores entre 8,1 y 9,1 mmol/L después de la primera vuelta y disminuyeron en la última vuelta a 5,7-6,0 mmol/L, a pesar de un período de descanso de 8 minutos entre cada vuelta para efectuar la extracción de sangre y otras mediciones. Una disminución similar en la concentración de lactato sanguíneo se observó en cinco ciclistas de montaña del equipo nacional italiano durante una carrera a *cross country* de 145 min de duración [24]. En ese estudio, los valores de lactato sanguíneo fueron 10-11 mmol/L luego de los primeros 45 minutos de carrera y 4,0-4,5 mmol/L en los últimos 20 minutos. Un perfil de lactato similar se informó para pruebas contrarreloj de ciclismo con una estrategia de largada rápida [22].

Contribución de la Energía Anaeróbica

Los valores de lactato sanguíneo mencionados con anterioridad no sólo confirman la disminución en la intensidad del ejercicio medida con HR si no que también sugieren que existe una contribución significativa del metabolismo anaeróbico hacia los requerimientos de energía del ciclismo *mountain bike*. Sin embargo, a excepción de estas mediciones de lactato sanguíneo durante una competencia simulada o real, ningún otro estudio ha investigado el sistema de energía anaeróbico durante las competencias de ciclismo *mountain bike*. Es necesario que se realicen investigaciones adicionales que utilicen otros métodos, ya que esta información podría ser útil para programar el entrenamiento aeróbico y anaeróbico en ciclistas de montaña. Por ejemplo, es probable que el déficit de oxígeno acumulado sea alto, dado que las mediciones directas de producción de potencia durante las carreras a *cross country* han mostrado variaciones altas, con valores de hasta 500 W durante el ciclismo en ascenso [7]. Además, en la salida de la carrera es necesaria una producción de potencia elevada. [7]

PERFIL FISIOLÓGICO DE LOS CICLISTAS DE MONTAÑA

Características Antropométricas

La estatura media de los ciclistas de montaña competitivos está entre 176 y 180cm (Tabla 1). La masa corporal media de los primeros 10 ciclistas de *mountain bike* en el último ranking de los Juegos Olímpicos de Verano de Atenas 2004 fue 67 ± 4 kg [25]. Este valor es similar al informado en los estudios recientes de ciclistas *mountain bike* de élite y de alto nivel (65-69kg) [26, 27] (Tabla 1). Lee et al. [27] informaron que la masa corporal media de los ciclistas en los campeones mundiales de ciclismo de montaña de 1997 a 2000 era aproximadamente 60 kg. Sin embargo, los datos de los campeones mundiales de 2001 a 2004 revelaron una masa corporal media de 72 kg. Además, dos de los competidores más exitosos de ciclismo de montaña (para las Olimpiadas de Atenas 2004), Bart Bretjens y Miguel Martínez, tenían una masa corporal de 77 kg y 55 kg, respectivamente. Estos datos se oponen a la idea de una asociación importante entre la masa corporal por se y el rendimiento.

Lo que sería más importante es la composición corporal. De hecho, se ha informado que el valor medio del porcentaje de grasa corporal de ciclistas *mountain bike* de alto nivel sería $<6,4\%$ [26, 27] y entre 8,5% y 14,3% para ciclistas de montaña de élite, [23, 30, 34], lo que sugiere que existe una asociación entre la composición corporal relativa y el nivel de competición. Esto no es sorprendente, dado la ventaja de tener una masa corporal inerte baja para las subidas características de los recorridos de las carreras de *cross country* [36]. Sin embargo, estos resultados deben ser

confirmados por los estudios con ciclistas de *mountain bike* de élite y sub-élite utilizando el mismo método de análisis de composición corporal.

Estudio (año)	Nivel de Competición	n	Talla (cm)	Masa (kg)	VO ₂ máx. (mL.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
Impellizzeri et al. (2005) (28)	Elite, Alto nivel	12	176 ±7	66 ±6	76,9 ± 5,3
Lee et al. (2002) (27)	Alto nivel	7	178 ±7	65 ±7	78,3 ± 4,4
Impellizzeri et al. (2005) (28)	Elite	13	177 ±8	65 ±6	72,1 ± 7,4
Nishli et al. (2004) (29)	Elite	8	170 ±6	64 ±7	67,8 ± 5,8
Stapelfeldt et al. (2004) (7)	Elite	9	180 ±6	69 ±5	66,5 ± 2,6
Warner et al. (2002) (30)	Elite	16	178 ±5	71 ±5	67,4 ± 4,6
Impellizzeri et al. (2002) (6)	Elite	5	175 ±3	64 ±5	75,9 ± 5,0
Baron (2001) (31)	Elite	25	179 ±5	69 ±7	68,4 ± 3,8
Wilber et al. (1997) (32)	Elite	10	176 ±7	72 ±8	70,0 ± 3,7
Cramp et al. (2004) (33)	Amateur	8	179 ±6	69 ±8	60,0 ± 3,7
MacRae et al. (2000) (34)	Amateur	6	180 ±7	77 ±4	58,4 ± 2,3
Berry et al. (2000) (36)	Amateur	8 (1 mujer)	178 ±7	72 ±8	56,6 ± 5,2

Tabla 1. Valores de consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) y de características antropométricas de los ciclistas de *mountain bike* de sexo masculino presentes en la bibliografía.

Consumo de Oxígeno Máximo

Se considera que el VO_{2max} es un indicador válido de la función integrada de los sistemas respiratorio, cardiovascular y muscular, durante el ejercicio y un importante determinante del rendimiento de resistencia [37]. Por consiguiente, no es sorprendente encontrar en la literatura informes de valores de VO_{2max} entre 66,5 y 78 mL.kg⁻¹.min⁻¹ en ciclistas de montaña de competición de diferentes niveles (Tabla 1). El análisis de estos informes sugiere que existe una asociación entre VO_{2max} y el nivel de competición, siendo los valores >70 mL.kg⁻¹.min⁻¹ un requisito previo para desempeñarse en carreras a *cross country* de alto nivel.

Los datos recolectados en ciclistas especializados en descenso del equipo Nacional Italiano [24] arrojaron valores de VO_{2max} de 63,2 mL.kg⁻¹.min⁻¹, lo que sugiere que, para el descenso, la potencia aeróbica elevada es menos importante que en los eventos a *cross country*. Según nuestros conocimientos, no hay ningún otro estudio sobre las características fisiológicas de ciclistas especializados en descenso.

Umbral Ventilatorio y Umbral del Lactato

El perfil de intensidad de ejercicio de las carreras con circuitos a *cross country* sugiere que los ciclistas de *mountain bike* deben poseer la habilidad de mantener elevadas tasas de trabajo durante un período prolongado de tiempo. Esto ha sido confirmado por diferentes estudios en el umbral ventilatorio y en el umbral del lactato (LT). Wilber et al. [32] observaron un LT (definido como un aumento exponencial en el lactato por encima del valor de la línea de base) correspondiente a 77% de VO_{2max} en los ciclistas en el equipo nacional de la Asociación Nacional de Mountain Bike. De manera similar, Impellizzeri et al. [6, 28] informaron intensidades en el LT y en OBLA que correspondían a 75-77% y 85-89% del VO_{2max}, respectivamente, en ciclistas de *mountain bike* de competición. En los ciclistas de montaña australianos de máximo nivel, Lee et al. [27] midieron un LT (mediante el método D-máximo modificado [38]) que correspondía a 86% de VO_{2max}. También se ha informado una intensidad relativa alta para el punto de compensación respiratorio (87% de VO_{2max}) en ciclistas de montaña de alto nivel. Estos valores son similares a los valores del umbral del lactato y umbral ventilatorio informados en ciclistas de ruta profesionales [13, 14]. A pesar de las diferencias metodológicas, todos estos estudios demuestran que los ciclistas de *mountain bike* pueden utilizar un alto porcentaje de su potencia aeróbica máxima para producir las tasas de trabajo elevadas y prolongadas que se necesitan para las competencias a *cross country*.

Potencia y Capacidad Anaeróbica

Aunque la potencia y la capacidad anaeróbicas pueden ser importantes para satisfacer las demandas fisiológicas de competencias de ciclismo *mountain bike*, hasta la fecha, sólo un estudio ha sido publicado en esta área. La investigación de Baron [31] comparó un grupo de ciclistas de *mountain bike* de nivel nacional e internacional con un grupo de estudiantes

de ciencias deportivas. Como era de esperar, durante un test incremental (40W cada 4 minutos), los ciclistas de montaña presentaron mayor VO_{2max} , producción de potencia máxima y producción de potencia en OBLA que los estudiantes de ciencias deportivas. Además, se observaron diferencias significativas entre los grupos, en la potencia anaeróbica (14,9 contra 13,3 W/kg), medida a través de una serie de tests de ciclismo isocinético de 10-segundo con diferentes cadencias. Datos de nuestro laboratorio que no han sido publicados, obtenidos en seis ciclistas de montaña de nivel nacional revelaron una producción de potencia máxima similar de 14,2 W/kg. Estos resultados preliminares sugieren que, una vez más, la potencia anaeróbica debe ser investigada con mayor detalle, dado que puede tener implicaciones en el entrenamiento y en las pruebas en los ciclistas de *mountain bike*.

Comparaciones con los Ciclistas de Ruta

Dos estudios publicados compararon de manera directa las características fisiológicas de ciclistas *mountain bike* y de ruta [27,32]. Wilber et al. [32] informaron valores de ligeramente menores de VO_{2max} , producción de potencia máxima (25W cada 1 minuto), producción de potencia absoluta y relativa y VO_2 en el LT en el equipo de la Asociación Nacional de Ciclismo Mountain Bike comparado con el equipo de la Federación de Ciclistas de Ruta de Estados Unidos. Recientemente, Lee et al [27] compararon las características fisiológicas y antropométricas de ciclistas de montaña de máximo nivel australianos y ciclistas de ruta profesionales, y no encontraron ninguna diferencia significativa entre los grupos en el consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}), producción de potencia máxima (50W cada 5 minutos), LT y producción de potencia promedio durante una prueba contrarreloj de 30-minutos expresada en valores absolutos, realizada en un laboratorio. Sin embargo, cuando estos parámetros fueron normalizados según la masa corporal, se encontraron valores significativamente más altos en los ciclistas *mountain bike* que en los de ruta. Además, los ciclistas de montaña tenían mayor cantidad de masa magra que los ciclistas de ruta.

La normalización de los parámetros fisiológicos en función de la masa corporal, aporta una mejor descripción que los valores absolutos de la capacidad de ascenso de los ciclistas [36, 39, 41]. Por consiguiente, los resultados de Lee et al [27] sugieren que los ciclistas de *mountain bike* poseen un perfil fisiológico y antropométrico similar a los escaladores. Recientemente presentamos datos obtenidos en nuestro laboratorio para probar esta hipótesis (Figura 3, observaciones inéditas), [42] donde se compararon las características físicas de 15 ciclistas de *mountain bike* de élite con 34 ciclistas de ruta profesionales divididos en escaladores (n = 9), ciclistas con buen rendimiento en todos los terrenos (n = 15) y especialistas en terreno llano (n = 10), según su papel en las competencias. Todos estos ciclistas fueron evaluados con el mismo protocolo, que consistía en incrementos de 25W cada minuto, comenzando en 100W. Se observó que la masa corporal de ciclistas de *mountain bike*, VO_{2max} y producción de potencia máxima expresados en condiciones tanto absolutas como relativas eran similares a las de los escaladores y de los ciclistas que rindían bien en todos los terrenos, pero fueron significativamente diferentes a los valores obtenidos en los ciclistas especializados en rutas llanas. Estos resultados coinciden con lo publicado en la literatura. De hecho, la masa corporal de ciclistas de *mountain bike* de alto nivel (65-66 kg) [26,27] está entre los 68 kg informados por Padilla et al. [40] para los ciclistas que rinden bien en todos los terrenos y los 62 y 64kg medido en los ciclistas de ascenso por Padilla et al. [40] y Lucía et al., [39] respectivamente. Además, los valores de VO_{2max} informados en la literatura para los ciclistas de montaña de alto nivel (Tabla 1) son similares al VO_{2max} estimado por Padilla et al. [40] para escaladores y ciclistas de ruta todo terreno (80,9 mL.kg-1.min-1 y 78,9 mL.kg-1.min-1, respectivamente). Por consiguiente, los resultados de nuestro laboratorio y la literatura sugieren que los ciclistas de *mountain bike* tienen características fisiológicas similares a las de los ciclistas escaladores y a los que rinden bien en todos los terrenos. Esto debe ser tenido en cuenta cuando los ciclistas consideran cambiar la participación en eventos *mountain bike* a eventos de competición de ruta (por ejemplo los casos de ciclistas de *mountain bike* como Cadel Evans, ganador de la Copa del Mundo, y Michael Rasmussen, ganador de un Campeonato Mundial) y viceversa.

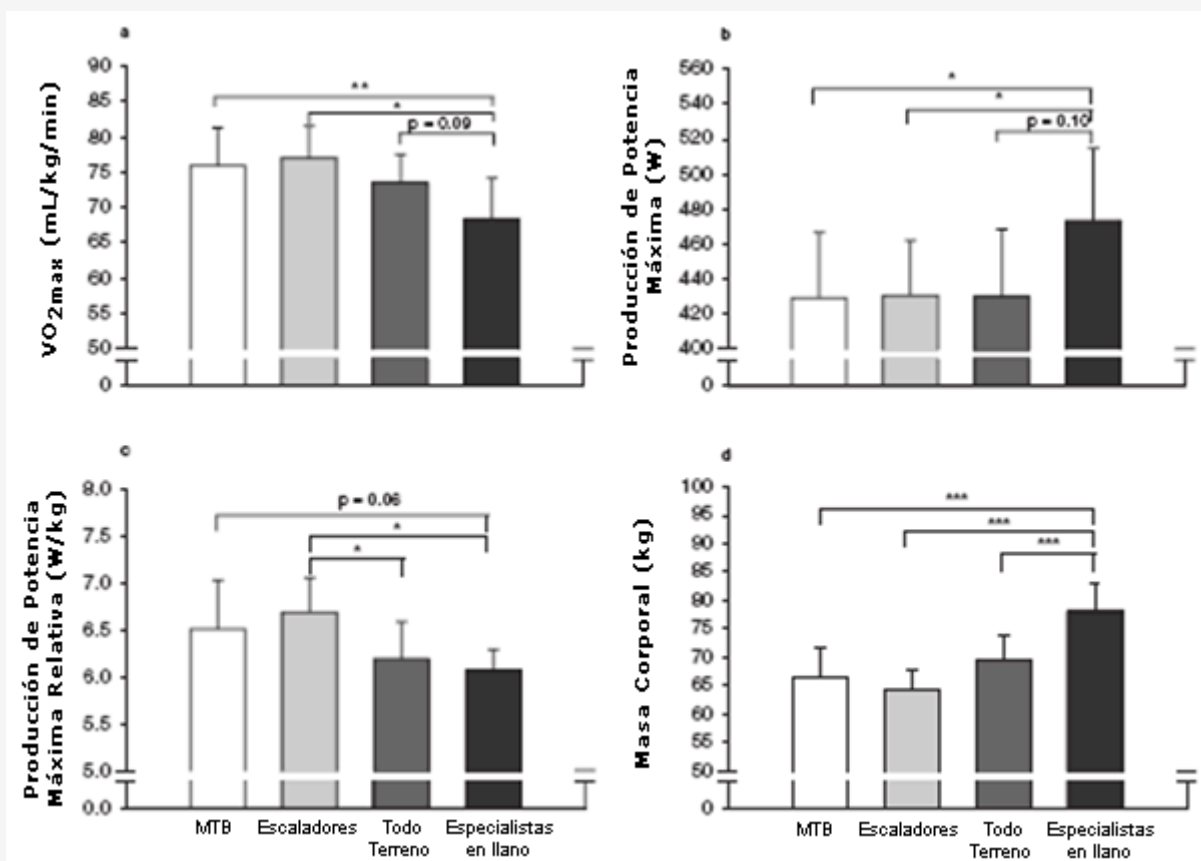


Figura 3. Comparaciones de masa corporal y de los resultados de test de ciclismo incremental de máxima intensidad entre ciclistas de montaña (MTB) (n=15) y ciclistas de ruta divididos según el rol que desempeñan en las competencias: escaladores (n=9), ciclistas todo terreno (n=15) y ciclistas especializados en terrenos llanos (n=10), realizadas mediante el test post hoc de Bonferroni luego de establecer las diferencias mediante ANOVA de una vía. VO_{2max} = Consumo de Oxígeno Máximo; * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001.

Finalmente, Warner et al. [30] compararon la densidad mineral ósea de 16 ciclistas de montaña y 14 ciclistas de ruta. Los autores observaron una mayor densidad mineral ósea normalizada según el peso corporal en ciclistas de *mountain bike*, en todos los sitios medidos por medio de absorciometría de rayos X de energía dual (columna lumbar, cuello femoral, trocánter mayor y triángulo de Ward). Warner et al. [30] explicaron que la mayor densidad mineral ósea de ciclistas de *mountain bike* es el resultado de un mayor estímulo osteogénico proporcionado por las fuerzas de carga provocadas por las irregularidades en la superficie del terreno. Notablemente, Warner et al. [30] no observaron ninguna diferencia en la fuerza y potencia muscular de los miembros inferiores, medida en press de piernas. Sin embargo, nadie ha investigado las diferencias potenciales en la fuerza muscular del tronco y de los miembros superiores.

Ciclistas Mountain Bike de Sexo Femenino

En la literatura, existen muy pocos datos fisiológicos sobre ciclistas de *mountain bike* de sexo femenino de competición. Wilber et al. [32] evaluaron a diez mujeres del equipo de la Asociación Nacional de Ciclismo Mountain Bike de los Estados Unidos (el grupo incluía a campeonas del mundo). Los valores medios de edad, talla y masa corporal fueron 30 años, 162 cm y 57,5 kg, respectivamente. Las ciclistas de *mountain bike* alcanzaron un VO_{2max} medio de 57,9 mL.kg⁻¹.min⁻¹ y la producción de potencia máxima alcanzada durante los tests incrementales (25 W cada minuto) fue de 313 W, lo que corresponde a 5,4 W/kg. Recientemente, Stapelfeldt et al. [7] reportaron las características de dos ciclistas femeninas de *mountain bike* de élite del equipo nacional alemán. Tenían 27 años y 30 años de edad, talla 169cm y 170cm, masa corporal 64 y 62 kg, VO_{2max} 58,2 y 60,6 mL.kg⁻¹.min⁻¹, producción de potencia máxima 320 W y 280 W (5,0 W/kg y 4,5 W/kg). Los resultados no publicados de nuestro laboratorio obtenidos en diez ciclistas femeninas de *mountain bike*, de nivel nacional e internacional utilizando el mismo protocolo de tests incremental utilizado por Wilber et al [32] revelaron valores similares.

Nosotros observamos valores medios de VO_{2max} similares, de $61,4 \pm 3,9$ mL.kg⁻¹.min⁻¹ y una producción de potencia máxima de 306 ± 31 W que corresponde a $5,9 \pm 0,7$ W/kg. El VO_{2max} tomó valores de 57,4 a 70,1 mL.kg⁻¹.min⁻¹, siendo éste último valor de la ciclista de *mountain bike* más exitosa dentro del grupo que poseía varias ubicaciones en las primeras posiciones de las competencias a *cross country* internacionales más importantes. La edad, talla y masa corporal media de estas ciclistas de *mountain bike* fueron 26 ± 5 años, 167 ± 5 cm y $52,5 \pm 3,0$ kg, respectivamente. En conjunto, estos datos son similares a los informados para ciclistas de élite de sexo femenino [43] y demuestran que las mujeres también necesitan una elevada potencia aeróbica y elevada relación potencia-peso para competir con éxito en los eventos a *cross country*.

Relación Entre las Pruebas Fisiológicas y el Rendimiento en el mountain bike

La valoración fisiológica de aptitud aeróbica es ampliamente utilizada por los científicos del deporte, para evaluar a atletas de resistencia, para establecer sus intensidades de entrenamiento, o como parte del proceso de identificación de talentos. La validez de las pruebas fisiológicas en el ciclismo de ruta, ha sido demostrada por varios estudios que muestran las relaciones significativas entre el rendimiento de ciclismo de ruta y VO_{2max} , producción de potencia máxima y umbral ventilatorio o LT [44, 49]. Sin embargo, las relaciones entre estos parámetros fisiológicos de aptitud física aeróbica y rendimiento en competencias de *mountain bike* de *cross country*, sólo han sido estudiadas recientemente en dos trabajos con ciclistas de *mountain bike* caracterizados por niveles de rendimiento heterogéneo u homogéneo. [2628].

En el primero de estos estudios, nosotros medimos el consumo de oxígeno máximo, producción de potencia máxima, LT y OBLA durante un test incremental (40W cada 4 minutos), y el tiempo para completar una carrera oficial, en un circuito a *cross country* en un grupo de ciclistas de *mountain bike* con grandes diferencias en la aptitud aeróbica (con valores que iban de 60,5 a 84,7 mL.kg⁻¹.min⁻¹) y en el rendimiento (valores de 82,4 a 108,8 minutos). Todos estos parámetros fisiológicos se correlacionaron significativamente con el tiempo de carrera (valores de -0,68 a -0,94, $p < 0,05$). Las correlaciones más fuertes se observaron cuando estos parámetros de aptitud física aeróbica fueron normalizados según la masa corporal. En el segundo estudio, nosotros investigamos si los parámetros fisiológicos similares eran buenos estimadores del rendimiento en un grupo más homogéneo de ciclistas de montaña de alto nivel, con un elevado VO_{2max} (valores entre 70,8 y 86,1 mL.kg⁻¹.min⁻¹) y con intervalo de rendimiento más estrecho (valores 110,8 a 116,6 minutos). Contrariamente al estudio anterior, los parámetros máximos de aptitud física aeróbica determinados usando un test incremental con incrementos de 25W por minuto, no se correlacionaron significativamente con el tiempo necesario para completar una carrera oficial en un circuito a *cross country*. Los dos únicos tests fisiológicos asociados con el tiempo de la carrera fueron la producción de potencia y el VO_2 en el punto de compensación respiratorio, cuando fueron normalizados según la masa corporal (tomando valores de -0,61 a 0,66; $p < 0,05$). Estos dos estudios confirman que (i) una elevada potencia aeróbica y la capacidad para utilizar un alto porcentaje de la misma, son requisitos previos para competir con éxito en las competencias de *mountain bike* de *cross country*; (ii) estos tests son válidos para evaluar la aptitud aeróbica en ciclistas de montaña de competición; y (iii) los parámetros fisiológicos deben ser normalizados según la masa corporal. Las correlaciones significativas entre el umbral del lactato y el umbral ventilatorio con el tiempo de carrera, también sugieren que tener una capacidad oxidativa muscular y/o capacidad endógena de amortiguación del pH altamente desarrolladas, son características fisiológicas importantes de ciclistas de montaña que deberían ser investigadas con más detalle a través de métodos directos.

Es importante tener en cuenta el hecho que, en ciclistas de montaña de alto nivel, la aptitud aeróbica explica sólo 40% de la variación en el rendimiento, lo que sugiere que otros factores deben ser considerados en la valoración fisiológica de estos atletas. [26] Nosotros creemos que los siguientes parámetros deben ser investigados con más detalle. El primero es la economía en el ciclismo de *mountain bike*, que nosotros definimos como la capacidad de convertir la energía aeróbica en velocidad en terrenos difíciles. Esta capacidad puede medirse en el laboratorio utilizando métodos similares a los empleados por Berry et al [16] (colocaron montículos en la banda de la cinta rodante). En el ciclismo de ruta, la habilidad de convertir la energía en potencia mecánica (es decir la eficacia mecánica) no parece ser diferente entre los niveles de rendimiento, aunque el debate sobre este aspecto todavía continúa. [50, 53] Sin embargo, en el ciclismo de montaña que se caracteriza por desarrollarse en condiciones de terreno difíciles, los factores como la habilidad técnica y la fuerza y resistencia de los músculos del tronco y de los miembros superiores, podrían influir en la capacidad de utilizar la energía aeróbica para generar velocidad. Es probable que estos factores varíen entre corredores de diferentes niveles de rendimiento, lo que transforma a la economía de ciclismo de *mountain bike* en un parámetro potencialmente importante para la valoración fisiológica de ciclistas de montaña. De manera similar, adicionar la potencia y capacidad anaeróbica a la batería de pruebas fisiológicas puede ser útil, pero deben ser validadas en ciclistas de montaña.

Habilidad Técnica

Durante las competencias de *cross country*, las diferentes condiciones del terreno requieren que los ciclistas de montaña tengan un alto grado de habilidad técnica para controlar y estabilizar la bicicleta. [17] Esto es particularmente necesario durante los numerosos descensos realizados a gran velocidad. Durante la carrera, algunos corredores aumentan su velocidad en los descensos, momento en el cual pueden ganar ventaja o disminuir el tiempo perdido en otras partes de la

carrera. Esta estrategia reduce el tiempo para reaccionar frente a las irregularidades de la superficie e incrementa las habilidades técnicas necesarias [54, 55]. Se ha sugerido que la diferencia en la habilidad y la tolerancia al riesgo explicarían la elevada variabilidad entre los individuos en la velocidad de descenso observada por Mastroianni et al. [56] en un grupo de 10 ciclistas de montaña amateur durante una competición simulada en un circuito *mountain bike*. Aunque la creencia que la habilidad técnica es un importante determinante del rendimiento en ciclismo de *mountain bike* está ampliamente aceptada entre entrenadores y corredores, no hay ningún dato empírico que apoye esta hipótesis. Por consiguiente, los estudios en esta área son muy necesarios, dado que pequeñas diferencias entre corredores podrían ser cruciales para el rendimiento entre ciclistas *mountain bike* que son fisiológicamente homogéneos.

Un nuevo concepto interesante ha sido sugerido por Damián Grundy, entrenador del equipo Australiano Nacional de Mountain Bike de Cross Country (comunicación personal, con autorización). El sugirió que, a diferencia de lo que ocurre en el ciclismo de ruta, la relación entre la producción de potencia y la velocidad puede cambiar en relación a la habilidad técnica. Los datos preliminares obtenidos en el Instituto Australiano de Deporte demostraron sorprendentemente que corredores que tenían un mayor tiempo de finalización del recorrido del circuito de *cross country* podían generar más producción de potencia que corredores con un mejor rendimiento. Esto sugeriría que la habilidad técnica puede efectivamente influenciar cuanta producción de potencia generada por los ciclistas se transfiere a la velocidad de ciclismo real. Esto también coincide con nuestra sugerencia de un posible rol de la economía de ciclismo de *mountain bike* en el rendimiento de *cross country*.

Variaciones en la Aptitud Aeróbica Durante las Temporadas

Hasta la fecha, no se ha publicado ningún estudio sobre las variaciones en la aptitud aeróbica de ciclistas de *mountain bike* durante las temporadas. Sin embargo, recientemente nosotros presentamos datos relacionados al VO_{2max} , LT y eficiencia, medidos en ejercicios en bicicleta ergométrica en un grupo de 12 ciclistas de montaña evaluados antes y después del período de entrenamiento de pretemporada invernal y dos veces durante la temporada de competencias hasta los Campeonatos Nacionales (Figura 4) [57]. En la Tabla 2 se observa que tanto los parámetros máximos como los submáximos de aptitud física aeróbica aumentaron significativamente en respuesta a 3 meses de entrenamiento pre-temporada y permanecieron estables durante la temporada. El aumento de 5% en VO_{2max} es similar al informado por Lucía et al. [58] en ciclistas profesionales. La producción de potencia en el umbral de lactato (LT) y OBLA aumentó 7% en los ciclistas de *mountain bike*. Esto es comparable con el 6-8% de cambio en la producción de potencia en el umbral ventilatorio informado por Lucía et al. [58] en los ciclistas de ruta, pero no con el aumento de 15% en el LT informado por los mismos autores.

Parámetros	Noviembre (descanso)	Febrero (pre-competencia)	Abril (competencia)	Julio (competencia)
Masa corporal (kg)	66,2 ± 6,9	65,8 ± 6,3	65,6 ± 6,5	65,5 ± 7,1
VO_2 max (mL.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	64,2 ± 6,2	67,8 ± 6,7 ^a	67,2 ± 6,8 ^a	68,6 ± 6,7 ^a
PPO (W)	346,8 ± 37,1	365,0 ± 37,4 ^b	363,8 ± 33,8 ^b	374,0 ± 34,3 ^{bc}
LT PO (W)	243,4 ± 37,9	265,3 ± 29,1 ^b	272,9 ± 29,6 ^b	270,9 ± 30,8 ^b
OBLA PO (W)	291,1 ± 45,0	319,3 ± 33,8 ^b	326,1 ± 37,2 ^b	322,4 ± 35,8 ^b
HR máx. (lat.min ⁻¹)	193,3	187,9 ± 8,0 ^a	187,0 ± 7,9 ^a	189,3 ± 8,4 ^a
HR LT (lat.min ⁻¹)	166,7 ± 10,6	161,4 ± 9,1 ^a	162,8 ± 8,6 ^a	160,2 ± 8,9 ^a
HR OBLA (lat.min ⁻¹)	180,1 ± 9,3	176,7 ± 7,8	177,5 ± 8,3	175,8 ± 8,0
GE (%)	20,1 ± 0,7	19,8 ± 0,9	20,0 ± 0,6	20,4 ± 0,9
DE (%)	25,8 ± 1,4	26,1 ± 1,3	25,9 ± 1,5	26,5 ± 1,1

Tabla 2. Cambios entre las temporadas en la aptitud aeróbica y otros parámetros en un grupo de ciclistas de montaña de competición (n = 12). ^asup > p < 0,05; ^b p < 0,01 presenta diferencias significativas con noviembre; ^c p = 0,08 presenta diferencias significativas con abril; Resultados del test de Bonferroni realizado luego del ANOVA de mediciones repetidas de una vía. Abreviaturas: DE = Eficiencia delta; GE = Eficiencia bruta; HR = Frecuencia Cardíaca; LT = Umbral del lactato (Intensidad que produce un aumento de 1 mmol/L en la concentración de lactato sanguíneo por encima del valor promedio establecido durante ejercicios al 40% y 60% del consumo máximo de oxígeno); OBLA = comienzo de la acumulación de lactato sanguíneo (intensidad que corresponde a una concentración sanguínea de lactato de 4 mmol/L); PO = Producción de potencia; PPO = Producción de potencia máxima; VO_{2max} = Consumo de oxígeno máximo.

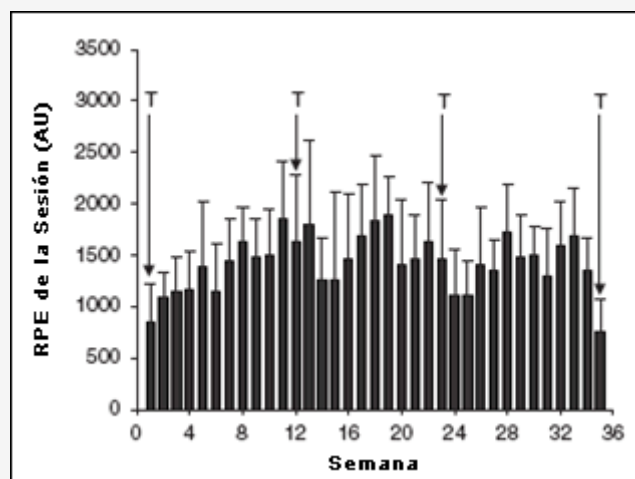


Figura 4. Momento en que se realizaron las cuatro sesiones de evaluación (T) durante la temporada. Las barras indican las carga media de entrenamiento semanal del grupo de ciclistas de montaña calculada usando el método del índice de esfuerzo percibido (RPE) de la sesión, es decir multiplicando el RPE del ciclista (usando la Escala de Índices de Categoría) correspondiente a la sesión completa de entrenamiento por la duración de la sesión en minutos [59]. AU = unidades arbitrarias.

Recientemente se ha sugerido que además de los tests aeróbicos tradicionales, se debería medir de manera rutinaria, la eficiencia de pedaleo en ciclistas profesionales [51, 60, 61]. En su reciente estudio de caso, Coyle [53] también sugirió que el éxito impresionante alcanzado por Lance Armstrong podría estar relacionado con una mejora en la eficiencia de pedaleo durante varios años. Por consiguiente, nosotros calculamos la eficiencia de pedaleo en éstos ciclistas de *mountain bike* utilizando datos medidos durante un test de ciclismo incremental, siguiendo la metodología de Moseley y Jeukendrup [62]. Sin embargo, no pudimos medir ningún cambio en la eficiencia gruesa o eficiencia delta durante el ciclismo estacionario, incluso en respuesta al entrenamiento pre-temporada, es decir cuando los atletas regresaban al entrenamiento después de 2-3 semanas de descanso. Sin embargo, no podemos excluir que se produjeran cambios en la eficiencia en los ciclistas de montaña a lo largo de períodos más prolongados de tiempo.

Estrategias nutricionales

La optimización del rendimiento exige prestar atención a otros numerosos factores diferentes al rendimiento físico. Dos estudios recientes han investigado el efecto de estrategias nutricionales pre-ejercicio sobre el rendimiento en ciclismo de montaña [23, 33]. Estos estudios son altamente relevantes para el ciclismo de montaña, porque durante competiciones de ciclismo de *mountain bike*, la alimentación o el consumo de líquidos puede ser difícil debido a los recorridos con mucha exigencia técnica.

Cramp et al. [33] investigaron el efecto de diferentes ingestas de carbohidratos pre-ejercicio sobre la producción total de energía durante una simulación de laboratorio de una carrera en bicicleta de montaña. Después de consumir una comida rica en carbohidratos (3,0 g/kg) los ciclistas de montaña generaron 3% más energía que los que habían consumido una comida con bajo contenido de carbohidratos (1,0 g/kg), aunque esta diferencia no alcanzó la significancia estadística. Sin embargo, como el efecto de esta estrategia nutricional podría ser importante en una competencia real, es necesario que se realicen estudios adicionales con un tamaño de muestra adecuado.

Los eventos competitivos de *mountain bike* a veces se realizan en condiciones calurosas. Dado que no siempre es posible reemplazar todo el fluido perdido durante la competencia, las estrategias de hidratación pre-ejercicio pueden ser muy importantes. En un estudio reciente, Wingo et al. [23] investigaron los efectos de la hidratación pre-ejercicio con glicerol y o con agua sola durante una simulación de campo de una competencia de ciclismo de montaña. Después de la pre-hidratación con glicerol, los ciclistas presentaron menos deshidratación y sensación de sed que los que sólo habían consumido agua. Sin embargo, no se observó ningún beneficio sobre el rendimiento. Nuevamente en este caso, se necesitan estudios adicionales en esta área de investigación.

Conclusiones y Lineamientos para las Futuras Investigaciones

Los estudios revisados en este trabajo demuestran que el ciclismo de cross country es un deporte de resistencia muy exigente, en el cual se impone una fuerte demanda sobre el sistema de energía aeróbico. Por lo tanto, es de suma importancia el entrenamiento y la evaluación de la aptitud aeróbica. Además, nosotros demostramos que los ciclistas de

mountain bike, al igual que lo ciclistas de ruta, se caracterizan por la elevada potencia y capacidad aeróbica, con similar relación potencia/peso y similares características antropométricas que los ciclistas escaladores y todo terreno. Sin embargo, la mayor intensidad del ejercicio y la menor duración de los eventos *mountain bike*, en comparación con los eventos de ruta sugieren que deben utilizarse estrategias de entrenamiento diferentes. Éstas deben incluir una reducción del volumen de entrenamiento y un aumento concomitante en la intensidad a través de, por ejemplo, entrenamiento intervalado e intermitente aeróbico. Se necesitan estudios de entrenamiento bien diseñados para confirmar estas indicaciones e investigar los efectos de otros tipos de entrenamiento, como entrenamiento de la fuerza específicos de los deportes y entrenamiento técnico de habilidades.

Como señalamos a lo largo de esta revisión, existen vacíos importantes en nuestro conocimiento sobre la fisiología del *mountain bike* para las disciplinas distintas a las competiciones de *cross country* en circuito (por ejemplo carreras de *cross country* de maratón y competencias de descenso). También se necesitan investigaciones sobre la economía de ciclismo *mountain bike*, la importancia de poseer una elevada potencia y capacidad anaeróbica para los eventos de *cross country*, sobre los aspectos fisiológicos del *mountain bike* en mujeres y sobre las estrategias nutricionales efectivas que permitan optimizar el rendimiento. Nosotros esperamos que este trabajo de revisión fomente una mayor investigación sobre todas estas áreas.

Dirección para Envío de Correspondencia

Dr Franco M. Impellizzeri, Human Performance Laboratory, MAPEI Sport Research Center, Via Don Minzoni 34, 21053 Castellanza (VA), Italia. Correo electrónico: fm.impellizzeri@alice.it.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Aldo Sassi (Director del Centro de Investigación Deportiva MAPEI) por su valioso apoyo.

Particular agradecimiento también a Ermanno Rampinini, Massimo Enduni, Piero Mognoni, Luca Guercilena, Gianna Meoni y Alessio Nencetti por su ayuda en la recolección de nuestros datos publicado y no publicados sobre los ciclistas de *mountain bike*. También deseamos agradecer a David T. Martin, Tammie Ebert y Damián Grundy del Instituto Australiano del Deporte por sus discusiones constructivas sobre el *mountain bike*.

Los ciclistas involucrados en los estudios no publicados firmaron un consentimiento informado, y los estudios, aun aquellos que no fueron publicados, fueron aprobados por el Comité de Revisión Institucional Independiente del Centro de Investigación Deportiva MAPEI. Los fondos para esta investigación fueron aportados por el grupo MAPEI. Los autores no poseen conflictos de interés que sean directamente relevantes para el contenido de este trabajo de revisión.

REFERENCIAS

1. National Bicycle Dealers Association (2006). 2004-05 NBDA statpak 2000; 43 (10): 1449-60 [online]. Available from URL: <http://nbda.com/> [Accessed 21. Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, et al. *Science and Sports* 2006 Apr 14]
2. British Cycling, National Cycling Centre (2006). General information/ J Sports Sci 2003; 21 (9): 767-87 statistics [online]. Available from URL: http://www.britishcycling.org.uk/membership/general_information.html [Accessed 2006 Apr 14]
3. International Cycling Union (2006). Part IV: mountain bike races. UCI cycling regulations version 03.02.2006 [online]. Available from URL: <http://62.50.72.82/modello.asp?1stLevelID = H&level1 = 0&level2 = 0&idnews = 2676> [Accessed 2006 Apr 14]
4. Union Cycliste Internationale (2006). Mountain bike intro [online]. Available from URL: <http://62.50.72.82/modello2.asp?1stLevelID = C&level1 = 3&level2 = 1&idnews = 1544> [Accessed 2006 Apr 14]
5. Nielens H, Lejeune T (2004). Bicycle shock absorption systems and energy expended by the cyclist. *Sports Med* 2004; 34 (2): 71-80
6. Impellizzeri F, Sassi A, Rodriguez-Alonso M, et al (2002). Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34 (11): 1808
7. Stapelfeldt B, Schwirtz A, Schumacher YO, et al (2004). Workload demands in mountain bike racing. *Int J Sports Med* 2004; 25 (4): 294-300
8. Padilla S, Mujika I, Orbananos J, et al (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (4): 850-6
9. Padilla S, Mujika I, Orbananos J, et al (2001). Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (5): 796-802
10. Lucia A, Hoyos J, Carvajal A, et al (1999). Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *Int J Sports Med* 1999; 20 (3): 167-72
11. Lucia A, Hoyos J, Santalla A, et al (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder?. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35 (5): 872-8

12. Fernandez-Garcia B, Perez-Landaluce J, Rodriguez-Alonso M et al (2000). Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (5): 1002-6
13. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 2001; 31 (5): 325-37
14. Mujika I, Padilla S (2001). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med* 2001; 31 (7): 479-87
15. McCole SD, Clancy K, Conte JC, et al (1990). Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol* 1990; 68 (2): 748-53
16. Berry MJ, Koves TR, Benedetto JJ (2000). The influence of speed, grade and mass during simulated off road bicycling. *Appl Ergon* 2000; 31 (5): 531-6
17. Wang EL, Hull ML (1997). A dynamic system model of an off-road cyclist. *J Biomech Eng* 1997; 119 (3): 248-53
18. Cable NT. Cardiovascular function. In: Eston R, Reilly T, editors. (1990). Kinanthropometry and exercise physiology laboratory manual: tests, procedures and data 117-33. *London: Routledge*
19. Seifert JG, Luetkemeier MJ, Spencer MK, et al (1997). The effects of mountain bike suspension systems on energy expenditure, physical exertion, and time trial performance during mountain bicycling. *Int J Sports Med* 1997; 18 (3): 197-200
20. Atkinson G, Brunskill A (2000). Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics* 2000; 43 (10): 1449-60
21. Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, et al (2003). Science and cycling: current knowledge and future directions for research. *J Sports Sci* 2003; 21 (9): 767-87
22. Mattern CO, Kenefick RW, Kertzer R, et al (2001). Impact of starting strategy on cycling performance. *Int J Sports Med* 2001; 22 (5): 350-5
23. Wingo JE, Casa DJ, Berger EM, et al (2004). Influence of a pre-exercise glycerol hydration beverage on performance and physiologic function during mountain-bike races in the heat. *J Athl Train* 2004; 39 (2): 169-75
24. Dal Monte A, Faina M (1999). Valutazione dell'atleta [in Italian]. *Torino: UTET*, 1999: 372-6
25. The official website of the ATHENS 2004 Olympic Games (2004). Athletes biographies [online]. Available from URL: <http://www.athens2004.com/en/ParticipantsAthletes/newParticipants> [Accessed 2004 Sep 1]
26. Impellizzeri FM, Marcora SM, Rampinini E, et al (2005). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *Br J Sports Med* 2005; 39 (10): 747-51
27. Lee H, Martin DT, Anson JM, et al (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *J Sports Sci* 2002; 20 (12): 1001-8
28. Impellizzeri FM, Rampinini E, Sassi A, et al (2005). Physiological correlates to off-road cycling performance. *J Sports Sci* 2005; 23: 41-7
29. Nishii T, Umemura Y, Kitagawa K (2004). Full suspension mountain bike improves off-road cycling performance. *J Sports Med Phys Fitness* 2004; 44 (4): 356-60
30. Warner SE, Shaw JM, Dalsky GP (2002). Bone mineral density of competitive male mountain and road cyclists. *Bone* 2002; 30 (1): 281-6
31. Baron R (2001). Aerobic and anaerobic power characteristics of off- road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (8): 1387-93
32. Wilber RL, Zawadzki KM, Kearney JT, et al (1997). Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29 (8): 1090-4
33. Cramp T, Broad E, Martin D, et al (2004). Effects of preexercise carbohydrate ingestion on mountain bike performance. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36 (9): 1602-9
34. MacRae H-H, Hise KJ, Allen PJ (2000). Effects of front and dual suspension mountain bike systems on uphill cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (7): 1276-80
35. Berry MJ, Cline CC, Berry CB, et al (1992). A comparison between two forms of aerobic dance and treadmill running. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24 (8): 946-51
36. Swain DP (1994). The influence of body mass in endurance bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 1994; 26 (1): 58-63
37. Bassett DR, Howley ET (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (1): 70-84
38. Bourdon P (2000). Blood lactate transition threshold: concepts and controversies. . In: *Gore CJ, editor. Physiological tests for elite athletes. Champaign (IL): Human Kinetics*
39. Lucia A, Joyos H, Chicharro JL (2000). Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med* 2000; 21 (7): 505-12
40. Padilla S, Mujika I, Cuesta G, et al (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31 (6): 878-85
41. Heil DP (1998). Scaling of submaximal oxygen uptake with body mass and combined mass during uphill treadmill bicycling. *J Appl Physiol* 1998; 85 (4): 1376-83
42. Impellizzeri FM, Sassi A (2005). Physiology of off-road cycling [abstract no. IS18-1]. *10th Annual Congress of European College of Sport Science; 2005; Belgrade, 28*
43. Martin DT, McLean B, Trewin C, et al (2001). Physiological characteristics of nationally competitive female road cyclists and demands of competition. . *Sports Med* 2001; 31 (7): 469-77
44. Hawley JA, Noakes TD (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1992; 65 (1): 79-83
45. Hopkins SR, McKenzie DC (1994). The laboratory assessment of endurance performance in cyclists. . *Can J Appl Physiol* 1994; 19 (3): 266-74
46. Coyle EF (1995). Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev* 1995; 23: 25-63
47. Lindsay FH, Hawley JA, Myburgh KH, et al (1996). Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28 (11): 1427-34

48. Nichols JF, Phares SL, Buono MJ (1997). Relationship between blood lactate response to exercise and endurance performance in competitive female master cyclists. *Int J Sports Med* 1997; 18 (6): 458-63
49. Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (8): 1270-5
50. Moseley L, Achten J, Martin JC, et al (2004). No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *Int J Sports Med* 2004; 25 (5): 374-9
51. Lucia A, Hoyos J, Perez M, et al (2002). Inverse relationship between VO2max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34 (12): 2079-84
52. Martin DT, Quod MJ, Gore CJ, et al (2005). Has Armstrong's cycle efficiency improved? . *J Appl Physiol* 2005; 99 (4): 1628-9
53. Coyle EF (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *J Appl Physiol* 2005; 98 (6): 2191-6
54. Gaulrapp H, Weber A, Rosemeyer B (2001). Injuries in mountain biking. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001; 9 (1): 48-53
55. Kronisch RL, Pfeiffer RP (2002). Mountain biking injuries: an update . *Sports Med* 2002; 32 (8): 523-37
56. Mastroianni GR, Zupan MF, Chuba DM, et al (2000). Voluntary pacing and energy cost of off-road cycling and running. *Appl Ergon* 2000; 31 (5): 479-85
57. Impellizzeri FM, Rampinini E, Marcora SM, et al (2005). Seasonal variations in efficiency and physiological parameters of aerobic fitness in off-road cyclists [abstract no. PP15-9]. *10th Annual Congress of European College of Sport Science; 2005; Belgrade, 263*
58. Lucia A, Hoyos J, Perez M, et al (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32 (10): 1777-82
59. Foster C (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome . *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30 (7): 1164-8
60. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005). The science of cycling: factors affecting performance: part 2 . *Sports Med* 2005; 35 (4): 313-37
61. Barbeau P, Serresse O, Boulay MR (1993). Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25 (9): 1062-9
62. Moseley L, Jeukendrup AE (2001). The reliability of cycling efficiency . *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (4): 621-7

Cita Original

Para citar este artículo en su versión original Impellizzeri Franco M. and Samuele M. Marcora. The Physiology of Mountain Biking. *Sports Med.*; 37 (1): 59-71. 2007