



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

**FACULTAD DE MEDICINA Y ODONTOLOGÍA
MEDIKUNTZA ETA ODONTOLOGIA FAKULTATEA**

**PERFIL FISIOLÓGICO DEL CICLISTA Y FACTORES
DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO EN EL
CICLISMO DE RUTA**

GUILLERMO JAVIER CUESTA BELTRÁN DE LUBIANO

**FACULTAD DE MEDICINA Y ODONTOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FISIOLOGÍA**

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría en primer lugar expresar mi sincera gratitud al Tribunal de esta tesis, por aceptar la evaluación de mi trabajo.

No hay palabras para agradecer a la dirección de este Trabajo Prof. Dr. Juan José Goiriena de Gandarias y Gandarias por su increíble dedicación, estímulo y enseñanzas, así como su gran calidad humana, sin lo cual no habría sido posible su realización.

Al Dr. Sabino Padilla que ha sido la persona que además de crear en mí la capacidad de investigar para entender, me facilitó sujetos y medios para realizar los estudios de investigación.

Al Dr. Iñigo Mujika por sus estímulos y aportaciones desde la experiencia para terminar este trabajo.

Al departamento de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad del País Vasco, por acoger y apoyar esta Tesis Doctoral.

Agradecer a todos los ciclistas participantes en estos estudios y a mi compañero José María Polo por su colaboración, su predisposición y ayuda en los estudios.

A todos aquellos familiares y amigos que durante todo este tiempo en algún momento me han apoyado.

A TODOS muchísimas gracias.

ABREVIATURAS

| | |
|-----------------------|---|
| ANOVA: | Análisis de la Varianza |
| AT: | Todoterreno |
| ATP: | Trifosfato de Adenosina |
| BM: | Masa Corporal |
| BSA: | Área de Superficie Corporal |
| CP: | Potencia Crítica |
| CRI: | Contrarreloj Individual |
| DS: | Desviación Standard |
| FA: | Área Frontal |
| FC: | Frecuencia Cardíaca |
| FC _{max} : | Frecuencia Cardíaca Máxima |
| FIAC: | Federación Internacional Amateur de Ciclismo |
| FICP: | Federación Internacional de Ciclismo Profesional |
| FT: | Rodador |
| H: | Talla del Ciclista |
| ILT: | Umbral de Lactato Individual |
| INT _{OBLA} : | Intensidad de Inicio de Acumulación de Lactato |
| IVT: | Umbral Ventilatorio Individual |
| La: | Lactato |
| [La]: | Concentración de Lactato Sanguíneo |
| lat/min: | Latidos por Minuto |
| LT: | Umbral de Lactato |
| MLSS: | Máximo Estado Estable de Lactato |
| mmol/l | Milimol por litro |
| NS: | No Significativo |
| OBLA | Punto de acumulación del lactato sanguíneo (4 mmol/l) |
| P: | Nivel de Probabilidad |
| PCr: | Fosfocreatina |
| Pot: | Potencia |
| RER: | Ratio de Intercambio Respiratorio |
| rpm: | Revoluciones por Minuto |
| SV2: | Segundo Umbral de Ventilación |
| TDF: | Tour de Francia |
| TRIMP: | Índice de la Carga de Entrenamiento |
| TT: | Contrarrelojista |
| UCI: | Unión Ciclista Internacional |
| UH: | Escalador |
| VCO ₂ : | Liberación de CO ₂ |
| VE: | Ventilación |
| VE _{max} : | Ventilación Máxima |
| VO ₂ : | Consumo de Oxígeno |
| VO _{2max} : | Consumo Máximo de Oxígeno |
| W: | Potencia, vatios |
| W _{max} : | Potencia Máxima |

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS | ix |
| ABREVIATURAS | x |
| ÍNDICE | xi |
| RESUMEN..... | 1 |
| 1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 1.1. PRÓLOGO A LA INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.2. EL MODELO DE JOYNER Y COYLE | 10 |
| 1.3. CONSUMO DE OXÍGENO | 15 |
| 1.4. VARIACIÓN DEL LACTATO | 19 |
| 1.5. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE CONTRARRELOJ..... | 22 |
| 1.6. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE LAS CARRERAS EN RUTA..... | 26 |
| 1.7. DÉFICIT DE OXÍGENO | 29 |
| 1.8. EFICIENCIA MECÁNICA BRUTA..... | 36 |
| 1.9. CICLISMO EN RUTA Y EN PISTA | 41 |
| 1.10. RESUMEN BIBLIOGRÁFICO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN..... | 46 |
| 2. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL | 56 |
| 2.1. OBJETIVOS..... | 57 |
| 3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL i..... | 59 |
| 3.1. ESTUDIO I. LA INTENSIDAD DE EJERCICIO OBLA COMO CRITERIO DE RESISTENCIA AERÓBICA EN CICLISTAS DE RUTA JÓVENES..... | 60 |
| 4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL ii..... | 78 |
| 4.1. ESTUDIO II. VALIDEZ DE UN TEST EN VELÓDROMO PARA CICLISTAS DE RUTA DE COMPETICIÓN | 79 |
| 5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL iii..... | 97 |
| 5.1. ESTUDIO III. RENDIMIENTO EN TERRENO LLANO Y EN SUBIDA EN CICLISMO DE RUTA PROFESIONAL | 98 |
| 6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES | 124 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 130 |

INDICE EXPANDIDO

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS | ix |
| ABREVIATURAS | x |
| ÍNDICE | xi |
| RESUMEN..... | 1 |
| 1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 1.1. PRÓLOGO A LA INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.2. EL MODELO DE JOYNER Y COYLE | 10 |
| 1.3. CONSUMO DE OXÍGENO | 15 |
| 1.4. VARIACIÓN DEL LACTATO | 19 |
| 1.5. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE CONTRARRELOJ..... | 22 |
| 1.6. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE LAS CARRERAS EN RUTA..... | 26 |
| 1.7. DÉFICIT DE OXÍGENO | 29 |
| 1.7.1 Déficit de oxígeno y contrarreloj..... | 32 |
| 1.7.2 Déficit de oxígeno y carreras en ruta..... | 33 |
| 1.8. EFICIENCIA MECÁNICA BRUTA..... | 36 |
| 1.8.1 Eficiencia mecánica bruta y contrarreloj..... | 38 |
| 1.8.2 Eficiencia mecánica bruta y carreras en ruta..... | 40 |
| 1.9. CICLISMO EN RUTA Y EN PISTA | 41 |
| 1.9.1. Reseña histórica..... | 41 |
| 1.9.2. Ciclismo en ruta..... | 43 |
| 1.9.3. Ciclismo en pista | 44 |
| 1.10. RESUMEN BIBLIOGRÁFICO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN..... | 46 |
| 1.10.1. Características físicas | 47 |
| 1.10.2. Características fisiológicas máximas..... | 48 |
| 1.10.3. Características fisiológicas submáximas | 48 |
| 1.10.4. Comparativa de valores entre especialistas | 49 |
| 1.10.5. Características antropométricas..... | 50 |
| 1.10.6. Valores fisiológicos máximos | 51 |
| 1.10.7. Valores fisiológicos submáximos..... | 51 |
| 1.10.8. Características de los diferentes tipos de pruebas de ruta | 52 |
| 1.10.9. Pruebas contrarreloj..... | 52 |
| 1.10.10. Pruebas por etapas | 54 |
| 2. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL | 56 |
| 2.1. OBJETIVOS..... | 57 |
| 3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL i..... | 59 |
| 3.1. ESTUDIO I. LA INTENSIDAD DE EJERCICIO OBLA COMO CRITERIO DE RESISTENCIA AERÓBICA EN CICLISTAS DE RUTA JÓVENES..... | 60 |
| 3.1.1. Introducción..... | 60 |
| 3.1.2. Material y métodos | 63 |
| 3.1.2.1. Sujetos | 63 |
| 3.1.2.2. Test de ejercicio progresivo máximo..... | 64 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.2.3. Test de ejercicio submáximo a intensidad constante | 65 |
| 3.1.2.4. Análisis estadísticos..... | 66 |
| 3.1.3. Resultados..... | 66 |
| 3.1.3.1. Test de ejercicio progresivo máximo..... | 66 |
| 3.1.3.2. Test de ejercicio submáximo a intensidad constante | 69 |
| 3.1.4. Discusión | 73 |
| 4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL ii..... | 78 |
| 4.1. ESTUDIO II. VALIDEZ DE UN TEST EN VELÓDROMO PARA CICLISTAS DE RUTA DE COMPETICIÓN | 79 |
| 4.1.1. Introducción..... | 79 |
| 4.1.2. Material y métodos | 80 |
| 4.1.2.1. Sujetos | 80 |
| 4.1.2.2. Test de velódromo | 81 |
| 4.1.2.3. Test de laboratorio | 84 |
| 4.1.2.4. Intensidad de ejercicio al OBLA | 85 |
| 4.1.2.5. Análisis estadísticos..... | 85 |
| 4.1.3. Resultados..... | 86 |
| 4.1.4. Discusión | 90 |
| 5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL iii..... | 97 |
| 5.1. ESTUDIO III. RENDIMIENTO EN TERRENO LLANO Y EN SUBIDA EN CICLISMO DE RUTA PROFESIONAL | 98 |
| 5.1.1. Introducción..... | 98 |
| 5.1.2. Material y métodos | 100 |
| 5.1.2.1. Sujetos | 100 |
| 5.1.2.2. Variables antropométricas | 101 |
| 5.1.2.3. Protocolo..... | 102 |
| 5.1.2.4. Potencia máxima..... | 103 |
| 5.1.2.5. Consumo máximo de oxígeno | 103 |
| 5.1.2.6. Lactato sanguíneo | 104 |
| 5.1.2.7. Determinación del LT y el OBLA | 104 |
| 5.1.2.8. Análisis estadísticos..... | 105 |
| 5.1.3. Resultados..... | 105 |
| 5.1.3.1. Variables antropométricas | 105 |
| 5.1.3.2. Potencia máxima..... | 106 |
| 5.1.3.3. Consumo máximo de oxígeno | 109 |
| 5.1.3.4. Lactato sanguíneo | 110 |
| 5.1.3.5. Potencia al LT y al OBLA..... | 112 |
| 5.1.4. Discusión | 113 |
| 6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES | 124 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA | 130 |

RESUMEN

La presente Memoria de Tesis Doctoral expone los estudios realizados para comprobar la validez de la concentración de lactato sanguíneo como biomarcador de la intensidad de ejercicio en bicicleta tanto en ergómetro como en pista, y para la agrupación de los ciclistas por modalidades específicas del ciclismo profesional. Con esa finalidad se realizaron tres estudios completos englobando las diversas condiciones experimentales que se plantearon.

El objetivo del Estudio I fue analizar la validez de la intensidad de ejercicio correspondiente al inicio de la acumulación de lactato sanguíneo (INT_{OBLA}) como método para evaluar la resistencia aeróbica de ciclistas de ruta jóvenes. Ocho ciclistas masculinos de ruta de categoría amateur llevaron a cabo una prueba sobre cicloergómetro de 30 minutos a la INT_{OBLA} . Cuatro ciclistas (G30, $N = 4$) fueron capaces de terminar el test de 30 minutos a la INT_{OBLA} . La concentración de lactato sanguíneo ([La]) no permaneció estable entre los minutos 10 y 30, lo cual es indicativo de que la producción de lactato fue superior a su aclaramiento. A pesar de fijar un valor idéntico de 4 mmol/l de [La], este estímulo resultó ser superior para los ciclistas que no fueron capaces de mantener la INT_{OBLA} durante el test de 30 minutos (G20, $N = 4$), que sufrieron un agotamiento prematuro tras 20 ± 2 min. El grupo G20 presentó una acumulación mayor de la concentración de lactato sanguíneo que el G30 ($P < 0,05$). Asimismo solo el G20 aumentó su frecuencia cardiaca respecto a la del del minuto 10 ($P < 0,05$ y $P < 0,01$ en los minutos 15 y 20, respectivamente) durante el test de 30 minutos. El G20 presentó valores superiores de ventilación y ratio de intercambio

respiratorio ($P < 0,05$). En conclusión, la INT_{OBLA} no debería utilizarse para determinar la resistencia aeróbica individual en ciclistas de ruta jóvenes de competición. Deberían utilizarse preferentemente otros métodos que tomen en consideración la individualidad de cada sujeto en el máximo estado estable de lactato.

El objetivo del Estudio II fue verificar la validez de un Test de Campo en velódromo consistente en repeticiones de 2.280 m, con una velocidad inicial de 28 km/h e incrementos de 1,5 km/h, separadas por periodos de recuperación de 1 minuto hasta el agotamiento. Doce ciclistas de ruta masculinos de categoría amateur llevaron a cabo test de ciclismo máximos en condiciones de velódromo y de laboratorio. El consumo de oxígeno (VO_2) y la potencia en el velódromo se estimaron utilizando ecuaciones propuestas por varios investigadores. Se compararon las respuestas fisiológicas a los dos test. Se estudiaron las relaciones entre el rendimiento en el velódromo y los parámetros fisiológicos medidos en el laboratorio. La potencia, la frecuencia cardiaca y el VO_2 máximos fueron similares en el velódromo y en el laboratorio (372 ± 50 y 365 ± 36 W; 195 ± 8 y 196 ± 9 latidos/min; $4,49 \pm 0,56$ y $4,49 \pm 0,46$ l/min, respectivamente), mientras que la máxima concentración sanguínea de lactato fue significativamente más elevada en el velódromo ($13,5 \pm 2,1$ y $11,8 \pm 3,1$ mmol/l). La frecuencia cardiaca en el velódromo fue más elevada a intensidades de ejercicio submáximas que suponían un 40%, un 50% y un 60% de la potencia aeróbica máxima, y la concentración de lactato sanguíneo en el velódromo fue también más elevada al 60%, 70% y 80% de la potencia aeróbica máxima. El parámetro de laboratorio que mostró la mayor correlación con la velocidad máxima de desplazamiento en el velódromo fue el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) expresado por unidad de masa corporal ($r = 0,93$). Además, se

comparó la precisión de diferentes métodos de estimación del costo metabólico del ciclismo, los coeficientes de resistencia a la rodadura, resistencia del aire y VO_{2max} . Se hallaron diferencias significativas. En conclusión, los resultados del estudio indican la validez de un test de velódromo utilizado para estimar parámetros aeróbicos máximos en ciclistas de ruta de competición, siempre que la estimación se realice utilizando ecuaciones bien establecidas. Cuando los ciclistas de ruta se someten a test en el laboratorio, los valores fisiológicos deberían expresarse por unidad de área de superficie corporal o masa corporal, para predecir con mayor precisión el nivel de rendimiento del ciclista en condiciones de campo específicas.

En el Estudio III se correlacionaron las capacidades fisiológicas y el rendimiento de ciclistas de ruta profesionales en relación con su especialidad dependiente de su morfotipo. Veinticuatro ciclistas profesionales masculinos de nivel internacional, clasificados como rodadores ($N = 5$), contrarrelojistas ($N = 4$), todoterrenos ($N = 6$) o escaladores ($N = 9$) completaron un test progresivo de ciclismo en laboratorio para evaluar la potencia máxima (W_{max}), el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), el umbral de lactato (LT) y el inicio de la acumulación de lactato sanguíneo (OBLA). Los escaladores tenían un ratio área frontal: masa corporal mayor ($5,23 \pm 0,09 \text{ m}^2/\text{kg}/10^3$) que los rodadores y los contrarrelojistas ($P < 0,05$). Los rodadores alcanzaron una W_{max} absoluta más elevada ($481 \pm 18 \text{ W}$), y los escaladores una W_{max} relativa a la masa corporal más elevada ($6,47 \pm 0,33 \text{ W/kg}$). Los valores de potencia al LT y al OBLA fueron significativamente más elevados en los rodadores (356 ± 41 y $417 \pm 45 \text{ W}$) y los contrarrelojistas (357 ± 41 y $409 \pm 46 \text{ W}$) que en los escaladores (308 ± 46 y $356 \pm 41 \text{ W}$). La relativización de estos valores con respecto al área frontal y a los exponentes de

masa corporal 0,32 y 0,79 minimizó las diferencias entre grupos, pero persistieron diferencias considerables entre los valores medios de los grupos. Los rodadores y los contrarrelojistas presentaron una W_{\max} por unidad de área frontal más elevada (1300 ± 62 y 1293 ± 57 W/m²), mientras que los contrarrelojistas presentaron unas potencias absolutas por kg^{0,32} y por kg^{0,79} más elevadas, así como potencias al LT y al OBLA por kg^{0,32}, por kg^{0,79} y por m². En conclusión, la relativización de los valores fisiológicos máximos y submáximos mostró una ventaja de rendimiento de los contrarrelojistas sobre los rodadores, los todoterrenos y los escaladores en todos los terrenos y condiciones de la competición. Los exponentes de 0,32 y 1 fueron los más apropiados para evaluar la capacidad del ciclista en terreno llano y en subida, respectivamente, mientras que los valores de W_{\max} son recomendables para predecir el rendimiento en eventos cortos en terreno llano, y la potencia al LT y al OBLA en etapas contrarreloj más largas y en subidas de montaña.

Palabras clave: ciclismo, lactato sanguíneo, potencia, test de velódromo, dimensiones corporales, rendimiento.

1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. PRÓLOGO A LA INTRODUCCIÓN

Desde el inicio y finalización de la presente Memoria de Tesis Doctoral han aparecido publicados numerosos artículos científicos y libros con nuevos desarrollos teóricos y prácticos de los ensayos de fisiología deportiva aquí descritos. Es por ello que se hace necesario hacer mención y describir brevemente la situación actual de la fisiología del deporte y de los modelos propuestos recientemente para dar un mejor contexto y significar en su justa medida la contribución que este trabajo ha tenido en las ideas establecidas actualmente. En esta línea, trabajos recientes que buscan identificar marcadores válidos para la detección temprana de la sobrecarga no funcional y el sobreentrenamiento de los deportistas de resistencia (Le Meur y col. 2013) y los modelos de interacción entre factores fisiológicos determinantes del rendimiento en deportes de resistencia (Joyner & Coyle 2008) merecen una atención especial.

Desde siempre la búsqueda de biomarcadores para determinar el rendimiento y la fatiga de los deportistas de competición ha sido un reto sin solución definitiva, incluso desde que se ha incorporado el deporte profesional dentro del ámbito de la Medicina.

La obtención de sistemas diagnósticos para evitar el sobreentrenamiento y sus negativas consecuencias en el rendimiento deportivo es una tarea que están desempeñando numerosos grupos de investigación (Lac & Maso 2004, Faria y col. 2005b). Los parámetros biológicos más habituales están basados en diversos aspectos bioquímicos, hormonales, fisiológicos e inmunológicos.

Los aspectos diagnósticos bioquímicos pueden ir desde análisis sencillos de hematología hasta sofisticados análisis de antioxidantes, aminoácidos, iones sanguíneos y hormonas.

Los aspectos diagnósticos fisiológicos pueden abarcar desde un simple control de peso hasta imágenes de resonancia magnética nuclear. La calidad del sueño, el porcentaje de masa corporal, el porcentaje de grasa, el control de gases en sangre, la frecuencia cardíaca en reposo, la electrocardiografía, la electromiografía, la presión sanguínea son otros parámetros que han sido ampliamente estudiados.

La metodología de los ensayos diagnósticos difiere notablemente entre situaciones de laboratorio y situaciones de campo, especialmente en deportes al aire libre como el caso particular del ciclismo en ruta. Además la no correspondencia en los resultados obtenidos en laboratorio con respecto a las situaciones reales de entrenamiento y competición es una cuestión difícil de explicar y cuya aproximación resulta de gran complejidad.

En cualquier caso, el protocolo de cargas progresivo en bicicleta ergométrica se ha tomado como un estándar para los estudios de laboratorio relacionados con ciclistas. Esta simplificación permite homogeneizar con un común denominador la mayoría de los trabajos científicos publicados con relación a determinaciones diagnósticas en el ciclismo (Faria y col. 2005).

Se han estudiado muchas variables fisiológicas para detectar el sobreentrenamiento, con resultados dispares. Una de las mediciones fisiológicas más extendidas en los deportistas de resistencia ha sido el desplazamiento de la curva de lactato (Jeukendrup y col. 1992, Fry y col. 1992, Snyder y col. 1995, Lehmann y col. 1996, Urhausen y col. 1998a, Bosquet y col. 2001). Sin embargo, no en todos los trabajos se ha llegado a las mismas conclusiones (Lehmann y col. 1991, Coutts y col. 2007).

Por otro lado, el descenso de la excreción urinaria nocturna de catecolaminas ha sido vinculado al sobreentrenamiento en deportistas de resistencia e interpretado como intrínsecamente asociado a una baja actividad del sistema simpático (Lehmann y col. 1992, Mackinnon y col. 1997) aunque, de nuevo, no en todos los trabajos se ha encontrado dicho vínculo con una actividad simpática reducida (Urhausen y col. 1998b, Uusitalo y col. 1998, Hedelin y col. 2000).

También se ha estudiado el descenso en la relación entre las hormonas, testosterona libre y cortisol como biomarcador fisiológico del “equilibrio anabólico-catabólico” (Adlercreutz y col. 1986), y en este caso también hay discrepancias en

cuanto a su valor diagnóstico (Lehmann y col. 1992, Mujika y col. 1996, Mackinnon y col. 1997, Urhausen y col. 1998b, Uusitalo y col. 1998), y otros investigadores que lo descartan como biomarcador válido (Halsón & Jeukendrup 2004, Tremblay y col. 2004).

Asimismo, los cambios en la frecuencia cardíaca (FC) en reposo y durante los ejercicios tanto máximos como submáximos han sido mostrados como biomarcadores del nivel de condición física en varios deportes (Costill y col. 1988, Lehmann y col. 1991, Jeukendrup y col. 1992, Snyder y col. 1995, Hedelin y col. 2000, Coutts y col. 2007), aunque se ha llevado a cabo una revisión de estos marcadores en el entorno de los efectos de la sobrecarga funcional en periodos de descanso, esfuerzo máximo y submáximo, en la FC y en su variabilidad. En esta línea, el trabajo concluye que cambios pequeños o moderados en estas variables limitan su utilidad clínica como biomarcadores significativos del sobreentrenamiento (Bosquet y col. 2008).

Recientemente, se ha publicado un trabajo que emplea simultáneamente la FC y la concentración de lactato para determinar la presencia de sobreentrenamiento, habiendo encontrado una probabilidad relativamente alta de diagnóstico mediante la combinación de ambos parámetros (Le Meur y col. 2013). También se han realizado trabajos de seguimiento de larga duración en el tiempo basados en los niveles de lactato para verificar los cambios físicos en ciclistas profesionales retirados (Mujika 2012), así como en periodos más limitados, como pueden ser los periodos de preparación de 10 semanas (Hopker y col. 2009, Oosthuysen y col. 2013) y en contrarrelojes de 60 minutos (Sayers y col. 2012).

Con todo, todavía en la actualidad, existe una gran falta de consenso entre los investigadores para proponer biomarcadores fisiológicos válidos, estudiándose recientemente incluso la oxigenación cerebral durante esfuerzos máximos y factores en las edades tempranas de la vida como causas que pueden contribuir a la fatiga, quedando pues reducido el campo de acción de los que actualmente se aplican a sus áreas deportivas específicas. Tanto es así que numerosos grupos de investigación han iniciado la búsqueda de dichos biomarcadores en aspectos psicológicos, en vez de fisiológicos, como las pruebas de inteligencia, partiendo de la hipótesis de que en estados de sobreentrenamiento las capacidades cognitivas se ven alteradas y los tiempos de respuesta a las preguntas y los errores cometidos varían significativamente (Nederhof y col. 2006, Nederhof y col. 2007, Hynynen y col. 2008, Dupuy y col. 2010, Dupuy y col. 2012). Sin embargo, estos trabajos no han podido verificar la viabilidad de las pruebas de inteligencia como parámetros para ser utilizados con independencia de otros biomarcadores, y tampoco se han realizado muestreos en la fase post-ejercicio.

1.2. EL MODELO DE JOYNER Y COYLE

En el ciclismo en ruta, que es una de las disciplinas más complejas dentro de las modalidades ciclistas, las exigencias de las capacidades fisiológicas varían muy notablemente entre individuos y entre carreras. Es por eso que factores como el trazado de la ruta, la climatología, el tipo de etapa (montaña, llana, contrarreloj, etc.), la relevancia internacional de la carrera y los objetivos o funciones de cada ciclista, hacen que la preparación y condición física no sea igual para todo el pelotón de ciclistas.

Teóricamente, las probabilidades óptimas de victoria surgen cuando la condición física y las aptitudes físicas del ciclista concurren sinérgicamente con el trazado de la carrera. De este tipo de consideraciones, surge la necesidad de buscar y favorecer picos de forma para determinadas carreras e incluso etapas específicas dentro de las grandes carreras.

Hay numerosos imponderables en este tipo de actividad deportiva ya que no es posible calcular *a priori* las necesidades energéticas, la potencia media requerida o la potencia máxima, como sí es posible en otras disciplinas en las que el recorrido es siempre el mismo. Los trabajos que existen en los que se ha analizado el trabajo medio realizado en grandes carreras, han mostrado que las intensidades de trabajo son relativamente bajas, del orden de 225 W, y hace pensar que miles de ciclistas en el mundo capaces de sostener en el tiempo el doble de potencia podrían tener éxito en estas carreras. Como tal premisa es falsa, esto demuestra que el simple dato del trabajo o potencia no sirve para estimar las necesidades fisiológicas que llevan al éxito en las carreras de ciclismo en ruta, aunque teóricamente la potencia desarrollada en determinados momentos de la carrera puede ser la clave para planificar la preparación o llevar a cabo una valoración fisiológica que conduzca al éxito en la carrera.

La bibliografía científica proporciona descripciones muy útiles de datos fisiológicos tanto de ciclistas amateur como profesionales (Faria 2005). Estos datos son obtenidos fundamentalmente en condiciones de laboratorio con individuos descansados y mediante estudios de duración corta, por lo que su aplicación a condiciones reales de competición es limitada, pues todavía resulta desconocida exactamente la respuesta

fisiológica durante la séptima hora de una carrera de un día o de algunas etapas de una Gran Vuelta en relación a los datos obtenidos en un laboratorio. Sin embargo, en un planteamiento individual, el conocimiento de la condición física y de algunos biomarcadores puede proporcionar pautas para la mejora del rendimiento mediante la preparación, independientemente del nivel en el que se compita.

Numerosos investigadores han intentado crear modelos del rendimiento deportivo en el ciclismo describiendo numerosos sistemas fisiológicos que podrían contribuir al rendimiento. Aun no siendo específicos para una disciplina ciclista, son útiles para explicar algunos de los factores fisiológicos clave que están asociados con el rendimiento. Estos factores fisiológicos podrían ser evaluados de una forma específica para cada modalidad ciclista teniendo en cuenta las cualidades y déficits del ciclista.

Uno de esos modelos es el propuesto por Michael Joyner y Ed Coyle, que han proporcionado algunos de los más completos datos fisiológicos aparecidos en la bibliografía científica con ciclistas de gran calidad (Joyner & Coyle 2008). Estos autores proponen que los tres pilares fundamentales para determinar y explicar el rendimiento deportivo son la cinética del VO_2 , la contribución anaeróbica y la eficiencia mecánica bruta.

Sin embargo, existen complejidades muy significativas asociadas con un modelo de este tipo y cuando se desea descartar algún elemento fisiológico, psicológico o biomecánico del modelo, aparecen numerosos componentes adicionales que podrían ser incluidos en cada área. A pesar de todas las limitaciones que mencionan los propios

autores de este tipo de modelos, éstos sirven para poner de manifiesto la contribución de los factores psicológicos a los éxitos y limitaciones de los propios ciclistas.

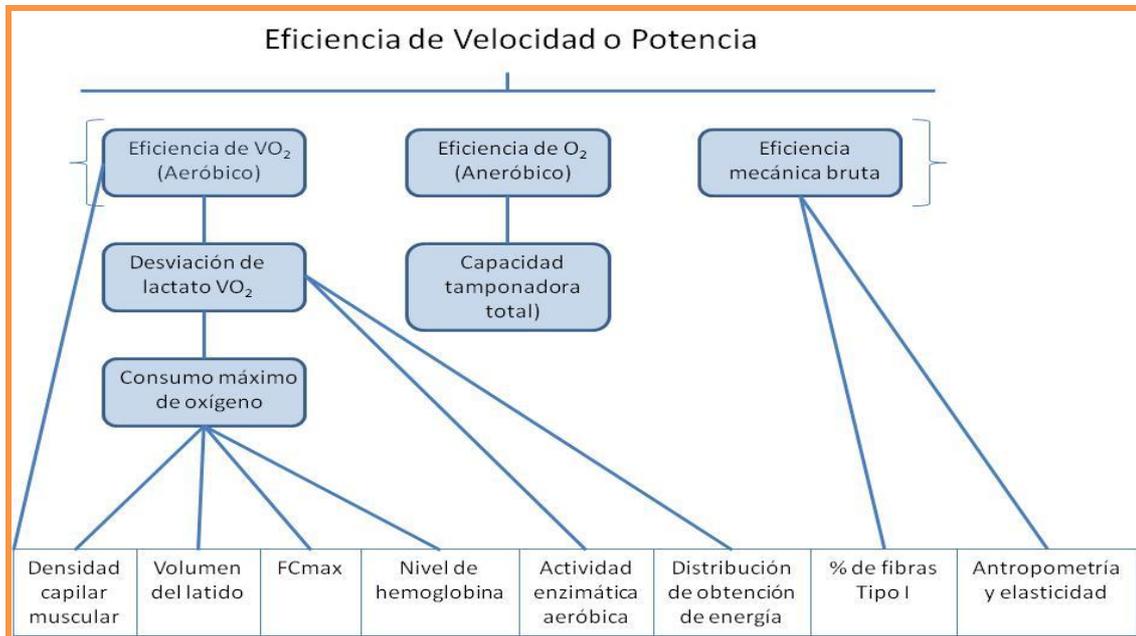


Figura 1. El modelo de rendimiento de Joyner y Coyle. Extracto del artículo “Endurance exercise performance: The physiology of Champions”, 2008 *The Journal of Physiology*, 586, 35-44.

Como se puede observar en la figura 1, si se parte de la línea superior del modelo, dos individuos podrían mostrar la misma potencia o velocidad sin tener las mismas capacidades fisiológicas. Este conocimiento tan básico podría ayudar a determinar unos programas específicos de entrenamiento para ambos ciclistas en un intento de mejorar sus capacidades individuales, y nos lleva entonces a una cuestión obvia, aunque a veces sobreestimada: el sistema complejo de relación de múltiples factores que influyen sobre el rendimiento en el ciclismo resaltada en el modelo, siendo muy difícil señalar un número exacto o valor incremental que pudiera distinguir las cualidades de rendimiento para cada componente fisiológico. Incluso para el valor de consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), que incorpora muchos factores fisiológicos

clave, la fiabilidad para distinguir entre ciclistas de buen rendimiento o malo es ciertamente escasa. Por ejemplo, valores que van desde los 60 ml/kg/min hasta los 85 ml/kg/min han sido reflejados como propios de ciclistas de ruta de categoría internacional, pero incluso ciclistas de segunda o tercera categoría en ruta pueden alcanzar dichos valores en el rango inferior de los mismos. En términos de un análisis muy básico y para la aplicación de este modelo, la conversión de la energía en trabajo mecánico (eficiencia) siempre va a ser de primordial importancia para cualquier disciplina ciclista. Cualquier sistema energético empleado, si el ciclista está rodando a su máxima capacidad o incluso a bajos ritmos de trabajo, el objetivo será siempre obtener la mayor cantidad de trabajo mecánico a partir de la energía física aportada.

La importancia de los componentes del modelo aeróbicos y anaeróbicos dependerá de la disciplina ciclista sobre la que se trabaje. Los componentes no son excluyentes entre sí en ninguna disciplina y es relativamente difícil precisar la contribución de cada uno de esos factores además debido a las diferencias individuales existentes a la hora de aplicar los sistemas energéticos que contribuyen al rendimiento del trabajo (Abiss 2005). Sin embargo, es correcto referirse a sistemas energéticos “predominantes” en función de la especialidad del ciclista (por ejemplo *sprint*, con uso predominantemente anaeróbico de energía, y/o *contrarreloj* de larga distancia empleando predominantemente energía aeróbica).

Además, obviamente, hay competiciones ciclistas donde se requieran ambas contribuciones en determinados momentos de la competición, y por lo tanto se puede pensar que ambas contribuciones deben ser equilibradas. Yendo un paso más allá,

competiciones como las carreras de ruta podrían ser subdivididas en cientos de pequeñas fases, cada una de ellas con contribuciones diferentes de los dos sistemas de obtención de energía. Este cálculo se ve todavía más complicado por la introducción de parámetros que aumentan la resistencia al movimiento, como la masa corporal y la resistencia del aire. Por ello, las capacidades fisiológicas de un ciclista estarán mejor orientadas hacia fases específicas de la carrera.

Esto se ve claramente en el ciclismo en ruta donde los requerimientos exactos en términos aeróbicos y anaeróbicos pueden variar muy notablemente durante las numerosas y diferentes fases de la carrera. Así pues, se hace necesario que el ciclista sea consciente de sus capacidades y cómo emplearlas tácticamente en respuesta a las habilidades de los demás para estar en posición de ventaja en la carrera. Este conocimiento surge como fruto de la propia experiencia y del conocimiento profundo del perfil de la carrera y de los rivales. Esta información puede ayudar a establecer un plan de carrera, a distinguir entre especialistas dentro del ciclismo en ruta, como por ejemplo escaladores, esprínteres, rodadores y demás.

1.3. CONSUMO DE OXÍGENO

Uno de los términos más discutidos e investigados en la bibliografía del rendimiento deportivo es el consumo de oxígeno. El máximo consumo de oxígeno (VO_{2max}) está definido como la tasa más alta a la cual el oxígeno puede ser captado y utilizado por el cuerpo durante el ejercicio intenso. En la literatura científica, un incremento del VO_{2max} es el método más común de demostrar un efecto de

entrenamiento. Esto no significa que el VO_{2max} sea el único parámetro que determina el rendimiento en un ejercicio de resistencia. Si un individuo puede trabajar aeróbicamente y emplear el proceso aeróbico para desarrollar un trabajo mecánico, es muy previsible que la fatiga llegue a un ritmo más lento que trabajando anaeróbicamente. Hay una tendencia a que la energía sea originada a partir de fuentes anaeróbicas a medida que el deportista se acerca al límite superior del consumo de oxígeno (típicamente sobre el 85% VO_{2max}) pero la disponibilidad de energía mediante el mecanismo anaeróbico no es sostenible en el tiempo (Abiss & Laursen 2005). Por ello, durante las competiciones de resistencia, la fatiga prematura puede tener lugar en un escenario donde el individuo está trabajando en niveles próximos a su VO_{2max} depende de factores a nivel muscular, como la densidad capilar, las enzimas y el tipo de fibra muscular. El camino del O_2 desde la atmósfera hasta la mitocondria contiene una serie de pasos, cada uno de los cuales podría representar un impedimento potencial para el flujo de O_2 . Los factores fisiológicos que pueden limitar el VO_{2max} son: 1) la capacidad de difusión pulmonar, 2) el máximo gasto cardíaco, 3) la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, y 4) las características del músculo esquelético. Los primeros tres factores pueden ser clasificados como factores “centrales”; el cuarto es llamado un factor “periférico”. El consumo máximo de oxígeno refleja el límite superior de la capacidad aeróbica, puede ser medido por métodos directos o indirectos y la evidencia acerca de que el VO_{2max} está muy determinado por las capacidades cardiovasculares del individuo, específicamente el gasto cardíaco, que históricamente ha sido considerado el principal factor a considerar que contribuye al rendimiento deportivo satisfactorio, sin que el ciclismo sea una excepción. A pesar de existir similitudes entre todas las categorías ciclistas, en general, los ciclistas de élite tienden a presentar mayores dimensiones funcionales cardíacas

comparando con los ciclistas de categorías inferiores (por ejemplo, tienen mayores volúmenes de eyección sistólica). Este hecho aumenta la capacidad de repartir nutrientes clave, eliminar los subproductos del metabolismo y mejora de la termorregulación del organismo.

Durante un ejercicio progresivo, se ha demostrado que el volumen de eyección sistólica aumenta en un primer momento y luego se estabiliza cuando la intensidad del esfuerzo llega aproximadamente al 50% del VO_{2max} . Este es un ejercicio relativamente suave en intensidad que puede ser sostenido en periodos muy prolongados de tiempo. Estimular y sobrecargar la capacidad cardíaca son procedimientos clave para mejorar el rendimiento deportivo a través de la adaptación (Robergs 2014).

La capacidad de transporte de la sangre (concentración de hemoglobina) es otro parámetro muy bien estudiado. Se ha demostrado a través de su manipulación que tiene una gran influencia sobre el VO_{2max} y anecdóticamente se sabe que influye también en el rendimiento en carreras ciclistas en ruta. A la postre, si un deportista puede llevar más oxígeno al músculo, será menos propenso a utilizar el sistema de energía anaeróbico. La excepción a este postulado se encuentra en las situaciones en las que el músculo se encuentra trabajando a pleno rendimiento aeróbico y, por ello, le resulta imposible consumir más oxígeno. Esto puede ocurrir en las fibras musculares con pobre capacidad aeróbica y alto potencial anaeróbico, como las fibras musculares de contracción rápida de tipo IIb.

En términos de transporte de oxígeno a las células del músculo, la red capilar del músculo tiene una importancia determinante para la distribución de oxígeno. Teóricamente, una mayor densidad capilar reducirá el tiempo necesario para repartir los nutrientes y reducirá el tiempo necesario para eliminar los subproductos del metabolismo. Los investigadores que han estudiado la estructura capilar del músculo en ciclistas bien entrenados han sugerido que una densidad capilar aumentada, con más vías para que la sangre fluya a través del músculo activo, puede ser un factor diferencial en la capacidad de mantener mayores fracciones de la capacidad aeróbica máxima durante mayores periodos de tiempo. Esto podría aumentar la potencia máxima sostenible en el tiempo por parte de un ciclista debido a una mayor contribución aeróbica para el trabajo.

Curiosamente, uno de los mayores componentes asociados a un alto VO_{2max} es la capacidad de implicar una mayor masa muscular. El modelo de rendimiento de Joyner y Coyle (2008) indica que la actividad enzimática aeróbica es importante para conseguir mayores valores de VO_{2max} . Sin embargo, si una mayor masa muscular está involucrada en el ejercicio, una mayor cantidad de enzimas aeróbicas estarán contribuyendo al esfuerzo y éste será repartido entre un mayor número de fibras musculares, por lo que se reducirá el estrés por unidad de masa muscular. Así, es más difícil alcanzar la capacidad funcional enzimática máxima de un individuo. La provisión de energía cuando se alcanza la capacidad funcional enzimática máxima simplemente lleva a un incremento de la contribución de fuentes de energía anaeróbica para cubrir la demanda de carga de trabajo. Un incremento de la concentración o actividad de las enzimas aeróbicas, junto

con la maximización de la masa muscular involucrada, podrían ser considerados como puntos clave para mejorar el rendimiento de resistencia mediante el entrenamiento.

Desde un punto de vista práctico, no hay estudios que hayan descrito la intensidad ideal de ejercicio para estimular la generación de enzimas en el deportista. Sin embargo, por la ubicación de estas enzimas en las mitocondrias es sabido que algunas intensidades de ejercicio hacen que aumenten de número y tamaño. A intensidades bajas de ejercicio, 50% $\text{VO}_{2\text{max}}$, el desarrollo mitocondrial se ha observado también en músculos de contracción rápida. Un hecho relevante es que, elevados niveles mitocondriales requieren estimulación repetitiva mediante el entrenamiento por lo que es necesario un entrenamiento continuado para obtener los efectos deseados.

1.4. VARIACIÓN DEL LACTATO

La provisión de energía de fuentes aeróbicas es limitada y, una vez que se han alcanzado las capacidades máximas, el resto de energía ha de provenir de fuentes anaeróbicas. Siempre hay una contribución anaeróbica antes de alcanzar el $\text{VO}_{2\text{max}}$ y esta contribución es fácilmente cuantificable mediante el lactato circulante en la sangre. Aunque muchos deportistas y preparadores físicos pueden tener unas nociones básicas sobre este tema, la investigación sobre los mecanismos bioquímicos implicados en la producción de ácido láctico es controvertida. El metabolismo anaeróbico del glucógeno conlleva la acumulación de ácidos inorgánicos, de los cuales el ácido láctico es el más importante. El lactato se deriva junto con los hidrogeniones (H^+) del ácido láctico, producto final de la glucólisis anaeróbica, al disociarse en el espacio citosólico del

músculo a un pH fisiológico. Es por esta razón por la que algunos investigadores han cuestionado la existencia del ácido láctico, mientras consideran al lactato como un factor clave para lograr más energía y actualmente responsabilizan a los hidrogeniones (H^+) de la acidosis como agente fatigante que limita el rendimiento de resistencia. Sin embargo, dado que estos compuestos son derivados de los carbohidratos (glucógeno muscular y glucosa), el lactato podría ser visto simplemente como un marcador de estrés e indicativo del consumo de carbohidratos durante el ejercicio. En este caso, el lactato estaría implicado en la predicción del rendimiento porque un consumo acelerado de carbohidratos es una de las causas de la fatiga prematura durante el ejercicio (Hopker 2013). De hecho, el patrón de acumulación de lactato varía con el entrenamiento de resistencia (ver figura 2):

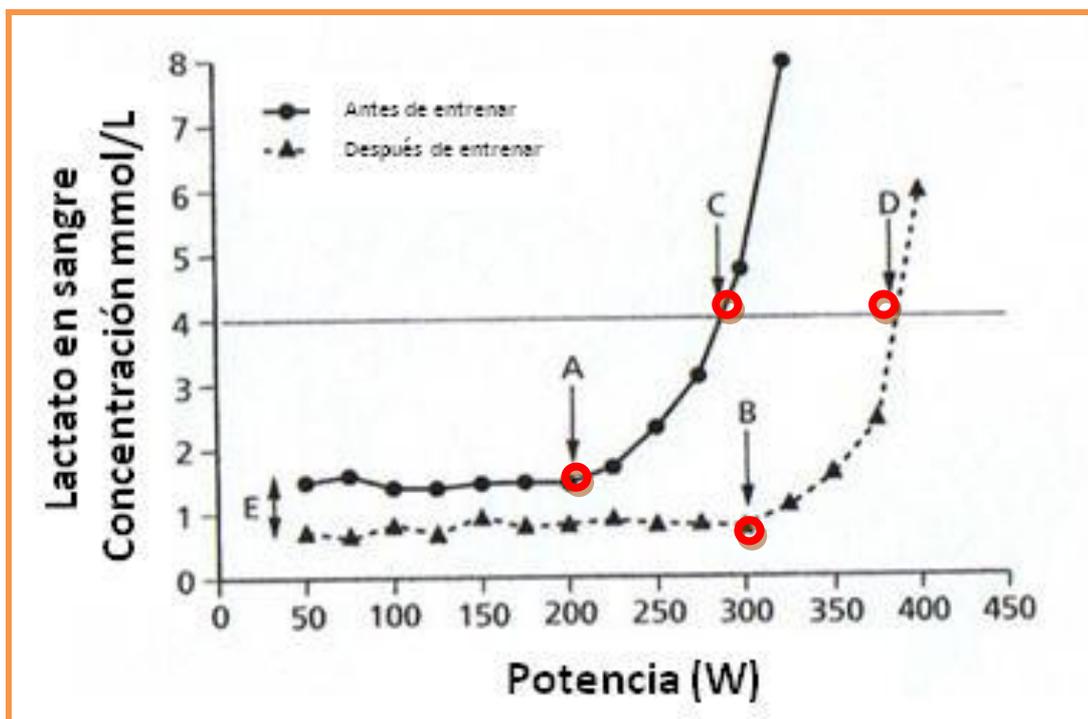


Figura 2. Respuesta del lactato al ejercicio incremental antes y después del entrenamiento.

En la figura 2 se pueden observar hasta tres cambios en los patrones de acumulación de lactato en los que el ejercicio aeróbico genera un desplazamiento hacia la derecha en el punto en el que el lactato empieza a acumularse por encima de los valores basales. Este punto se denomina comúnmente como el de la acumulación de lactato. La acumulación de lactato indica la intensidad de ejercicio a partir de la cual el cuerpo empieza a estar sometido a demasiado estrés, con un consumo anaeróbico acelerado de los carbohidratos almacenados. Por ello, el provocar una desviación del lactato hacia la derecha y hacia potencias más elevadas antes de que ocurra esta respuesta es una de las cuestiones en las que mayor hincapié se hace a la hora de diseñar los programas de entrenamiento. La línea horizontal de la figura 2 indica una intensidad de ejercicio equivalente a 4 mmol/l de concentración de lactato. Esta intensidad se suele considerar como el nivel de trabajo que se puede llevar a cabo durante un periodo de tiempo de aproximadamente una hora. Así mismo, en la figura 2 se puede ver cómo la potencia generada a una concentración de 4 mmol/l se ha desplazado hacia la derecha, elevando el ritmo de trabajo que se puede mantener durante una hora (líneas C y D). La tercera respuesta que se ha observado en ciclistas muy entrenados es que muestran una línea base de lactato circulante en sangre muy baja, y esto es indicativo de ritmos de consumo de carbohidratos mucho más reducidos que en momentos de pre-entrenamiento o que en ciclistas de poco entrenados.

En el ciclismo en ruta, cuando las exigencias del recorrido no pueden satisfacerse con los aportes aeróbicos, la producción de esa potencia adicional requiere de fuentes de energía anaeróbica. Trump y col. (1996) concluyen que la contribución energética en esfuerzos repetidos de 30 segundos en cicloergómetro es de

aproximadamente 15% vía glucólisis anaeróbica, 15% vía degradación de la fosfocreatina (PCr) y 70% vía metabolismo aeróbico. A pesar de que como se ha comentado anteriormente el lactato es objeto de discusión en el contexto de la fatiga y sus consecuencias negativas en el rendimiento de los ciclistas, su producción conlleva una pequeña cantidad de aporte de energía útil. Esta pequeña cantidad de energía aportada junto con los incrementos del almacenamiento de fosfocreatina en el músculo con el entrenamiento de esprines son extremadamente importantes en el ciclismo en ruta porque pueden marcar la diferencia en la aceleración necesaria para alejarse de otros ciclistas, como por ejemplo en un esprint final, en una escapada, en un intento de conectar con un grupo de escapados o simplemente cuando se hace una “selección” en grupos del pelotón. Por tanto, en términos de rendimiento en carreras en ruta, esa potencia adicional que puede aportar la energía del lactato puede tener una influencia notable. El modelo del lactato está en constante revisión y actualización de manera que hay trabajos científicos específicamente dirigidos hacia la verificación de la validez del método (Dumke y col. 2006, Figueira y col. 2008) así como en ejercicios específicos de ciclismo (Padilla y col. 2008).

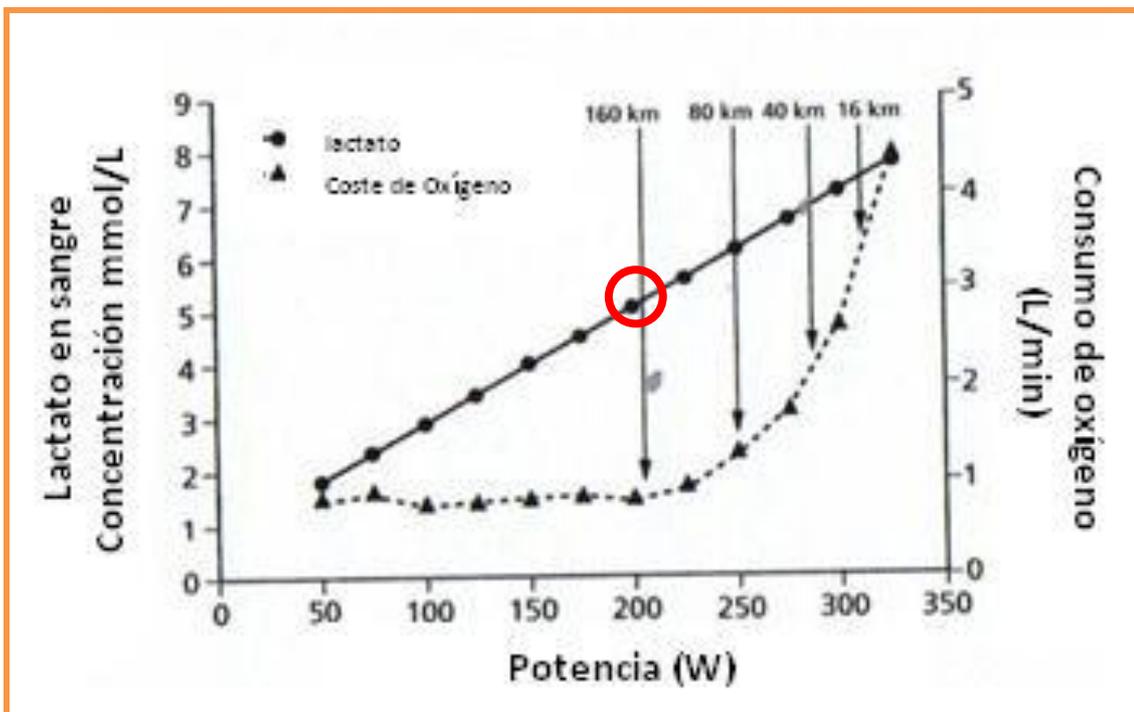
1.5. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE CONTRARRELOJ

A un nivel básico, las contrarrelojes en el ciclismo consisten en maximizar el trabajo que un individuo puede lograr para una distancia preestablecida. El éxito está determinado por la cantidad de trabajo mecánico desarrollado en relación a las

resistencias aplicadas al ciclista y a la bicicleta. En el caso de las contrarrelojes en circuitos llanos, la fuerza de resistencia principal es la del aire. Así pues, la clave del éxito es la potencia generada en relación al área frontal del ciclista y de su bicicleta. La capacidad para distribuir ese trabajo mecánico depende de la fisiología del ciclista, en la que mantener una alta capacidad de trabajo durante el mayor tiempo posible es la clave del éxito. Como la mayoría de las contrarrelojes tienen una duración superior a 2 minutos, la capacidad aeróbica de los ciclistas puede rendir mucho más que la capacidad anaeróbica. Por lo tanto, los sistemas aeróbicos predominan en las contrarrelojes. Sin embargo, y a pesar de contribuir en una pequeña porción de toda la energía empleada en la contrarreloj, cada carrera de este tipo implica también un notable componente anaeróbico (Faria 2005).

El componente anaeróbico puede contribuir con muy poca potencia dentro del promedio de potencia total desarrollada, dependiendo del potencial anaeróbico del ciclista. Por ello, si el ciclista empieza muy fuerte una contrarreloj y emplea su provisión de energía anaeróbica a un ritmo que puede acabar con dicha provisión antes de que acabe la carrera, el ciclista tendrá que reducir su potencia por debajo del nivel que hubiera podido desarrollar con una buena distribución del esfuerzo a lo largo del recorrido. En este sentido, niveles adecuados de glucógeno muscular y la dosificación del esfuerzo es primordial. Teniendo esto en mente, resulta de especial importancia aumentar las reservas de glucógeno muscular con la ingesta, analizar y ajustar la intensidad del ejercicio para lograr respuestas fisiológicas que puedan ser sostenidas durante toda la carrera sin fatiga prematura y evitando las consecuencias negativas asociadas a tal situación.

La figura 3A muestra el consumo de oxígeno y el patrón de lactato (contribuciones anaeróbicas) en ejercicios progresivos, con las capacidades contrarrelojistas dibujadas en la gráfica. Como puede observarse, carreras más cortas permiten a los ciclistas mantener una contribución anaeróbica mayor comparando con carreras más largas.



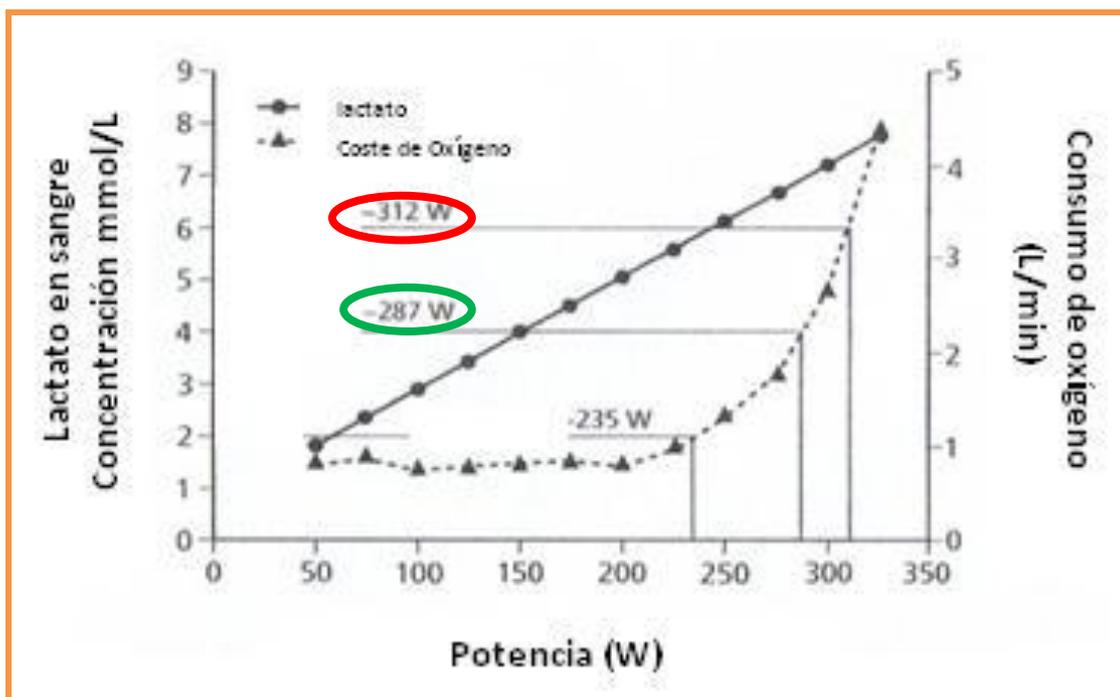


Figura 3. A: Respuesta del lactato y consumo de oxígeno con respecto al tiempo en una contrarreloj. **B:** Respuesta del lactato al ritmo de pedaleo.

Los ciclistas suelen preguntar por qué no pueden mantener una potencia para 40 km que sí pueden realizar durante las contrarrelojes de 16 km. Las respuestas fisiológicas que describen este escenario están presentes en la figura 3B. La carga de trabajo a una concentración de lactato de 4 mmol/l es una intensidad que teóricamente indicaría un rendimiento sobre 40 km y que equivale a 287 W en este individuo. Si el ciclista mantiene un ritmo constante, podría mantener este ritmo de trabajo a lo largo de toda la carrera. Sin embargo, si el ciclista empezó fuerte (por ejemplo, cercano al ritmo de 16 km, 312 W), el coste en oxígeno del ejercicio podría aumentar un poco, pero la concentración de lactato en la sangre aumentaría 2 mmol/l (aproximadamente un 50%). El ciclista debe compensar y eliminar este lactato de la sangre. Por lo que, por cada minuto que el individuo ha estado acumulando esos 2 mmol/l extra de lactato, deberá

volver a una intensidad que permita reducir esos 2 mmol/l. Además, como la relación entre intensidad de trabajo y lactato no es lineal, la ecuación lleva a una potencia de 235 W. Entonces, si un ciclista trabaja durante 20 minutos a 312 W, 20 minutos a 287 W y 20 minutos a 235 W, la potencia media desarrollada sería aproximadamente 278 W, que significa una reducción del 3% de rendimiento comparado con trabajar a un ritmo constante de 287 W. En la figura 3B también se puede observar que el consumo de oxígeno también caería aproximadamente un 3% con la reducción de potencia. Sin embargo, teniendo en cuenta que existen procesos oxidativos aeróbicos involucrados en la eliminación del lactato, el coste en oxígeno no cae necesariamente, por lo que en ese caso la relación de coste de oxígeno por potencia generada aumenta porque se reduce la eficiencia energética (Hopker 2013).

El conocimiento también de los datos de frecuencia cardiaca y potencia realizada es muy útil para realizar el control y seguimiento de la intensidad de ejercicio realizada, y se puede conseguir mediante el empleo de pulsómetros y potenciómetros. Sin embargo, los procedimientos de calibración han de ser realizados estrictamente, ya que un pequeño error en la medición de la potencia puede provocar grandes pérdidas en el rendimiento (Millet y col. 2014).

1.6. CONSUMO DE OXÍGENO Y RESPUESTAS DE LACTATO DURANTE LAS CARRERAS EN RUTA

Si el contrarrelojista tiene que ser cuidadoso sobre el ritmo de pedaleo y controlar inteligentemente la intensidad del ejercicio para obtener el máximo

rendimiento mecánico a partir de sus capacidades fisiológicas, el ciclista de ruta tendrá que saber que en determinadas fases de la carrera él no podrá controlar la intensidad del ejercicio. Así, el momento que le puede limitar es el periodo de ejercicio que produzca una alta concentración de lactato, con procesos aeróbicos limitados por la necesidad de reconvertir el lactato o eliminar los subproductos del metabolismo, por lo que el ciclista de ruta necesita considerar cómo minimizar el coste de energía del movimiento. Cuanto menor sea la intensidad del ejercicio, menos cantidad de lactato se genera y menor será el impacto de los metabolitos relacionados con la fatiga.

Sabiendo que el lactato va a ser generado esto nos lleva a la conclusión de que el ciclista deberá ser capaz de tolerar la acumulación del mismo y los metabolitos asociados, y ser capaz de eliminarlos para reducir el impacto que tienen en términos de fatiga.

Hay una gran variabilidad en los ritmos de eliminación del lactato de la sangre. La figura 4 muestra la variabilidad en un grupo de 10 ciclistas que han llevado a cabo un esprint máximo y, por un periodo de 20 minutos después de ese esfuerzo, donde recuperaron activamente al 50% de su capacidad máxima de trabajo. En cualquier tiempo de esta gráfica, hay una gran variedad de respuestas: la primera línea vertical muestra que algunos individuos pueden reducir a la mitad su concentración de lactato en un periodo de 6-7 minutos, mientras que otros requieren el doble de ese tiempo. Los procesos aeróbicos son un factor clave para eliminar el lactato. Así, como el lactato exige un coste adicional de oxígeno, aquellos con mayores ritmos de eliminación del lactato, desviarán durante menos tiempo su capacidad aeróbica hacia este proceso. Este

esquema se ve alterado cuando se repiten sucesivamente las necesidades de eliminación de lactato y demás metabolitos durante las diferentes fases de la carrera. Por ello, cuanto más rápidamente sean eliminados estos metabolitos, mayores probabilidades tendrá el ciclista de generar, tolerar y eliminar el lactato de los esfuerzos posteriores (Hopker 2013).

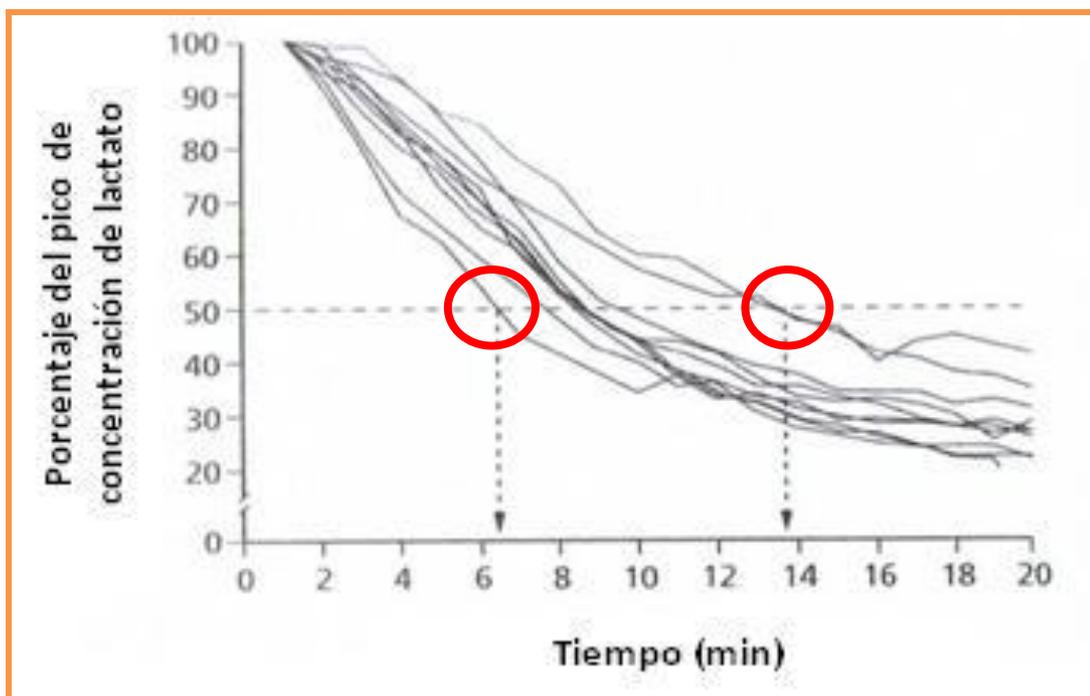


Figura 4. Curvas individuales de recuperación del lactato en sangre. Las líneas punteadas indican la variabilidad en el tiempo necesario para reducir el lactato en sangre al 50% del pico máximo.

Las carreras ciclistas en ruta requieren una combinación de factores fisiológicos y tácticos. El ir a rueda es probablemente una de las tácticas más importantes y resulta fundamental para tener éxito, pues cuando se va a rueda se da una reducción del coste de oxígeno y la respuesta de lactato para una velocidad dada. Sin embargo, en subidas intensas y cortas donde los beneficios del ir a rueda son limitados o inexistentes, los

esfuerzos necesarios son muy similares entre los ciclistas que van en cabeza y los que van a rueda (Hopker 2013). Es por ello que en las escapadas, donde se hacen relevos para ir en cabeza, resulta de vital importancia no hacer el relevo de descanso durante una subida porque la recuperación será mínima. Si se cae en esta trampa, se observarán mayores cantidades de lactato y de demanda de oxígeno comparando con el individuo que haya hecho la recuperación en el llano y haya tirado del grupo durante la subida. Los ciclistas experimentados tienen conciencia de lo que ocurre en este tipo de circunstancias, por lo que si un ciclista experimentado tira en una subida, lo hará de tal manera que el coste de esa fase de la carrera recaiga también sobre los otros ciclistas, valorando también la distancia a meta por si le conviene o no romper el contacto con sus compañeros de escapada e irse solo.

1.7. DÉFICIT DE OXÍGENO

La distribución o variabilidad de la potencia generada durante cualquier evento ciclista fluctuará, y este parámetro influirá en los componentes aeróbicos y anaeróbicos a los que hacen referencia Joyner y Coyle (2008). Los dos extremos son la contrarreloj, donde la tendencia es a obtener una distribución de potencia muy cercana a la media del recorrido, y las etapas en línea, donde gran parte del tiempo se emplean potencias muy bajas pero con grandes picos de potencia en determinadas fases de la carrera. Así, para un ciclista de ruta, la alta variabilidad se verá reflejada en un aumento de la contribución anaeróbica al rendimiento para cubrir las necesidades puntuales e intermitentes. En este escenario, el sistema cardiovascular aeróbico no puede adaptarse instantáneamente a las variaciones de demanda energética.

El empleo de los sistemas anaeróbicos de energía en el contexto de una carrera ciclista en ruta es probablemente muy simplista en el modelo citado anteriormente, debido a los grandes cambios en el ritmo de trabajo que se producen en esta modalidad deportiva. Demandas de energía explosivas y muy cortas suelen ser alimentadas por sistemas alácticos, generalmente por degradación de trifosfato de adenosina (ATP) y fosfocreatina (PCr), mientras que los esfuerzos anaeróbicos sostenidos en el tiempo suelen ser alimentados por la generación de ATP a través del mecanismo de formación de lactato. La importancia de estos sistemas de energía probablemente depende de la capacidad del organismo para neutralizar la acidez que se genera durante este proceso.

El entrenamiento puede modular los sistemas de energía anaeróbicos, y un ciclista puede desear minimizar la cantidad de energía derivada de estos sistemas durante el ejercicio a bajos niveles de intensidad, incrementando al mismo tiempo la contribución de los sistemas aeróbicos al cómputo total de energía consumida, reservando la contribución anaeróbica para las ocasiones importantes en carrera que se han descrito anteriormente.

El ritmo al que un deportista puede consumir oxígeno en situaciones en las que el ritmo varía es otro concepto que sigue siendo investigado. Desde un punto de vista teórico, el ritmo al que un individuo puede responder a un incremento en el ritmo o en la potencia desarrollada empleando sistemas aeróbicos va a determinar cuánta energía va a necesitar de los sistemas anaeróbicos. La respuesta fisiológica ideal podría ser que el ciclista comenzara con su metabolismo anaeróbico más tarde, que conduciría a un

menor consumo de glucosa y a una menor generación de lactato. Teóricamente, una respuesta lenta podría crear una limitación para el rendimiento al pasar de baja intensidad a alta intensidad. Sin embargo, el ciclista de ruta tendrá que luchar potencialmente con centenares de dichas fases en cada carrera. En estas circunstancias, una respuesta fisiológica lenta podría tener consecuencias desfavorables, provocando un uso excesivo de la energía anaeróbica y un vaciamiento de los depósitos de carbohidratos, y ambas situaciones podrían llevar a una fatiga prematura (Hopker 2013).

La figura 5 representa las respuestas de dos ciclistas. Ambos empiezan con una potencia de salida baja de 100 W justo antes de realizar una carga intensa de 300 W en el cicloergómetro. La ejecución de la carga es idéntica, y sin embargo, el ritmo al que los 2 ciclistas pueden emplear sus sistemas de energía aeróbica es diferente.

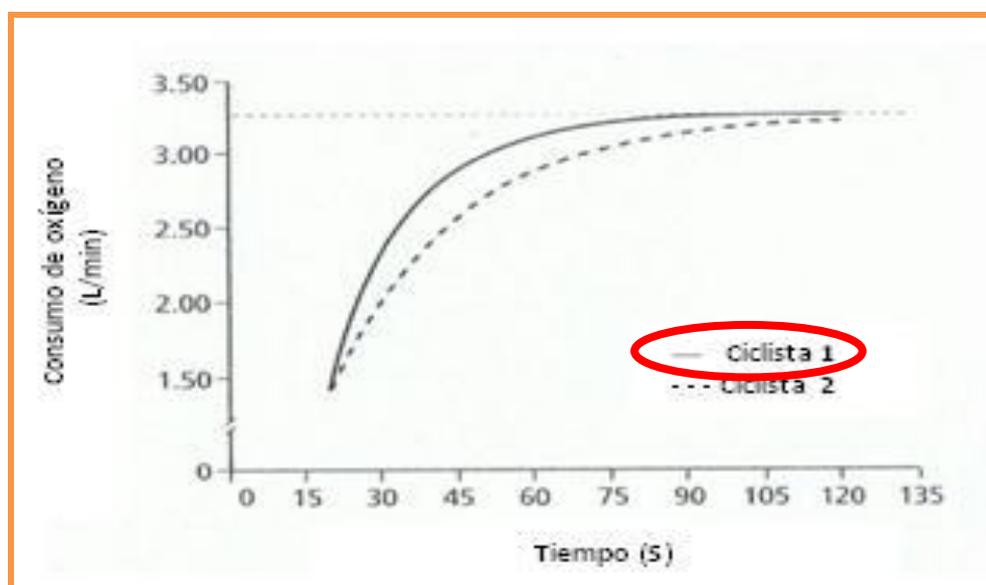


Figura 5. Curvas cinéticas de consumo de oxígeno de dos ciclistas: El ciclista 1 tiene una cinética más rápida y por ello cuando la demanda de energía crece muy rápido, empleará menos fuentes anaeróbicas.

El ciclista 1 tiene una cinética más rápida que el ciclista 2 y cubre su demanda de energía utilizando con mayor eficiencia sus fuentes aeróbicas. Teniendo la misma carga de trabajo, el ciclista 2 ha de recurrir más intensamente a sus fuentes de energía anaeróbica que el ciclista 1. Esto explicaría una transición singular de baja carga de trabajo a alta carga de trabajo, por lo que este efecto se verá aumentado en carreras donde estos cambios de carga de trabajo se producen frecuentemente, ocasionando que el ciclista 2 se viera penalizado por el coste energético que supone la eliminación de los metabolitos de las reacciones metabólicas como puede ser el lactato.

1.7.1 Déficit de oxígeno y contrarreloj

Es probable que la contribución anaeróbica al trabajo que requiere una contrarreloj sea relativamente mínima, con la excepción de las “prólogo” o las cronoescaladas. El escenario ideal sería una contrarreloj en llano, sin viento, para obtener cinéticas de oxígeno rápidas al inicio del ejercicio. Entonces, considerando las respuestas lactato/oxígeno al ejercicio, el ciclista podría trabajar con la mayor carga de trabajo sostenible en el tiempo durante toda la prueba, con la acumulación de metabolitos anaeróbicos a un ritmo que alcanzara el máximo tolerable por el organismo justo al terminar la prueba. En otras palabras, seleccionar esta intensidad a partir del conocimiento de las propias capacidades fisiológicas es esencial, de otra forma una reducción en el trabajo y eficiencia se harían evidentes. Sin embargo, las contrarrelojes raramente son llanas y sin viento. Los modelos matemáticos también sugieren que la capacidad para incrementar los ritmos de trabajo donde las resistencias (inclinación o

viento) son elevadas, las posiciones aerodinámicas en los descensos y los periodos con viento favorable, nos llevan a realizar tiempos más rápidos. Además también hay periodos donde no se puede pedalear, curvas técnicas y descensos pronunciados y que suponen periodos de recuperación forzada y que deberían ser incluidos en la propia estrategia de la carrera. Así pues, el contrarrelojista tiene que tener en cuenta el recorrido, las condiciones y su propia fisiología para planificar su estrategia de carrera. Normalmente, el trabajo anaeróbico no se considera como un componente relevante para el éxito, pero cuando las altas necesidades de energía son frecuentes el impacto de la capacidad anaeróbica puede tener mayor valor (Hopker 2013).

1.7.2 Déficit de oxígeno y carreras en ruta

Durante las diferentes fases de una carrera ciclista en ruta, hay periodos de relativa inactividad y otros periodos en los que la exigencia física será máxima. Uno de los factores clave asociados con las carreras en ruta es que los momentos decisivos normalmente implican aportes de energía anaeróbicos. Para atacar, para ascender puertos de montaña o para subir posiciones en el pelotón se requiere de una gran capacidad anaeróbica. Si estas capacidades anaeróbicas están acompañadas por una cinética rápida de consumo de oxígeno, el metabolismo aeróbico podrá también apoyar las demandas anaeróbicas, sin recaer exclusivamente en el aporte anaeróbico. Como se ha mencionado anteriormente, cualquier individuo con cinéticas de oxígeno lentas, simplemente generará más y más energía anaeróbica durante todos los procesos de intensidad de carga de trabajo que se pueden dar en una carrera en ruta.

El pico de potencia explosiva puede ser también un requerimiento clave como describieron Hunter Allen y Andy Coggan (Allen & Coggan 2010). Sin embargo, se han de hacer algunas consideraciones antes de situar los picos de potencia en el ámbito anaeróbico a la hora de evaluar el nivel de capacidad de un ciclista. La figura 6 muestra dos ciclistas veteranos que fueron clasificados por Allen y Coggan como grado 3 por su pico de potencia de 5 segundos. Ambos ciclistas, similares en términos de altura y masa corporal, realizaron un trabajo de sprint a máxima intensidad durante 30 segundos en el laboratorio.

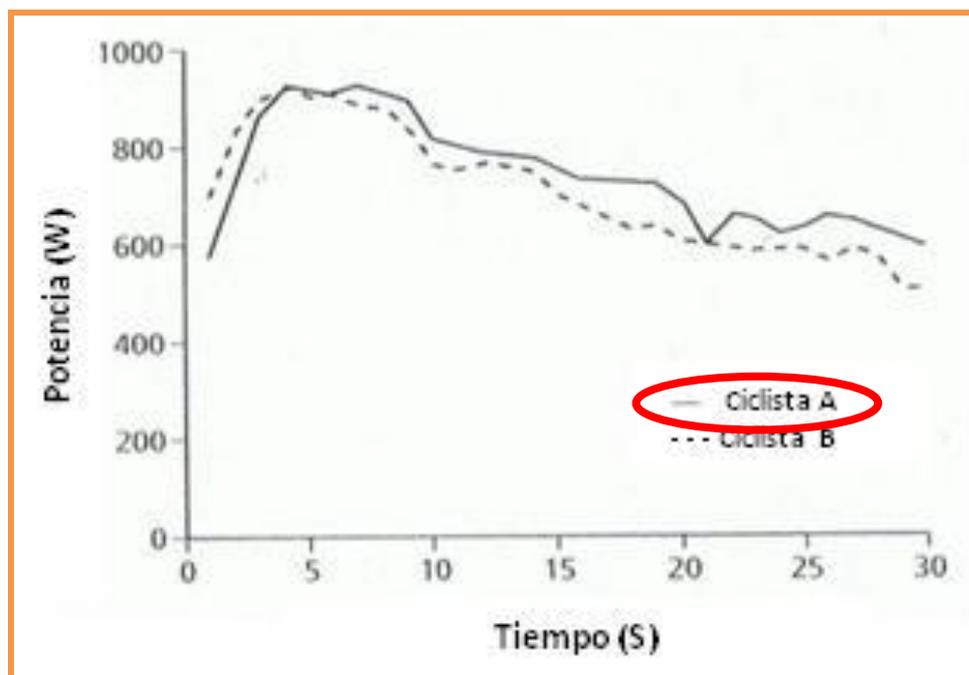


Figura 6. Pruebas de sprint similares para dos ciclistas. Un esprinter y un no-esprinter.

Asimismo el ciclista B presentó en el estudio de Allen y Coggan un pico ligeramente mayor a los 5 segundos que el ciclista A. Sin embargo, el ciclista A es un reconocido esprinter con campeonatos nacionales obtenidos utilizando sus capacidades, mientras que el ciclista B es un esprinter de bajo nivel en carrera. A primera vista,

parece que no hay grandes diferencias entre las capacidades de estos dos ciclistas en el laboratorio, sin embargo, teniendo en cuenta que el ciclista A es mucho más rápido alcanzando mayores cargas de trabajo, como se puede ver en los 3 primeros puntos de la figura, una modelización muy básica de estos datos sugiere que al ciclista B le costaría 13 segundos alcanzar al ciclista A en un esprint sin ir a rueda. La mayoría de los finales en esprint suelen ser mucho más cortos que este experimento y rondan los 6 a 10 segundos, en cuyo caso la aceleración del ciclista A es el factor clave para ganar los finales al esprint. Obviamente, el conocimiento de las propias capacidades e inteligencia para por ejemplo situarse es importante ya que ayuda a ver a qué distancia podría ser apropiado iniciar el esprint de cara a maximizar las posibilidades de victoria en la meta.

1.8. EFICIENCIA MECÁNICA BRUTA

Al fin y al cabo, el VO_2 , el lactato u otros parámetros fisiológicos no ganan carreras ciclistas pero la aplicación del trabajo mecánico o la potencia aplicada en el contexto adecuado y en el momento justo hace ganar carreras. El componente final del modelo de Joyner y Coyle (2008), la eficiencia, describe la conversión del trabajo físico en trabajo mecánico obtenido sobre la bicicleta. Como se ha mencionado anteriormente, en cualquier sistema de energía que se emplee, es muy importante la capacidad para convertir la energía disponible en trabajo mecánico. Conceptualmente, dos ciclistas podrían estar desarrollando el mismo nivel de estrés físico pero uno de ellos podría estar desarrollando una mayor potencia de trabajo con un coste idéntico de energía. En este caso, esa mayor eficiencia de aprovechamiento de la energía puede llevar al éxito. Normalmente, los valores de eficiencia suelen estar entre el 16% y el 24% (Lucia y col. 2002, Santalla y col. 2012), lo que significaría que dos ciclistas podrían presentar un coste de oxígeno de 3 l/min y un uso de nutrientes del 94% de carbohidratos y un 6% de lípidos (con una eliminación de 2,96 l/min de CO_2), pero el que tuviera una eficiencia del 16% generaría una potencia de 168 W y el que trabajara con una eficiencia del 24% generaría una potencia de 252 W. En otras palabras, se ganan 10 W aproximadamente por cada punto porcentual de eficiencia con este ejemplo. La adaptación supone mejora de la eficiencia tanto para regular los esfuerzos como para utilizar sustratos energéticos adecuados. Hay pocos datos de entrenamientos dirigidos a aumentar la eficiencia. Datos recogidos de Lance Armstrong desde 1992 hasta 1999 indican que mejoró su eficiencia un 1,9% durante ese periodo (Coyle, 2005). En periodos más cortos, algunos grupos de investigación han logrado describir datos sobre protocolos de entrenamiento que han

logrado mejorar la eficiencia. Hopker y col. (2009) relacionan la eficiencia con la cantidad de entrenamiento realizado a la INT_{OBLA} . Aagard y col. (2011) demostraron en ciclistas jóvenes mejoras en el tiempo en una contrarreloj de 45 minutos tras 16 semanas de entrenamiento de gimnasio con mejora de la fuerza entre el 12-20% aunque no mejoró su VO_{2max} . Su explicación es que no se observó ningún aumento de la densidad capilar en el músculo. Sin embargo, otros autores como Bastiaans y col. (2001), Yamamoto y col. (2010) sugieren dudas en la mejora del rendimiento deportivo de ciclistas profesionales con el entrenamiento de gimnasio, especialmente de baja intensidad, teniendo que tener presente la fatiga e interferencia que puede tener en su preparación realizar un programa mínimo de 10-12 semanas, aconsejando en todo caso realizar programas con altas cargas y bajas repeticiones y en los contrarrelojistas. Además, un posible aumento de la masa corporal (por aumento de la masa muscular) podría limitar el rendimiento para el terreno en subida, aunque tal aumento no tiene por qué producirse con un entrenamiento de fuerza adecuado (Rønnestad & Mujika 2014).

Se sabe que el patrón de reclutamiento muscular es importante para la eficiencia mecánica, habiendo sido demostrado que las fibras tipo I son más eficientes que las tipo II cuando el ejercicio se realiza a una intensidad submáxima con mejoras del 7% en la potencia máxima sobre 5 minutos y en la eficiencia del pedaleo (Coyle y col. 1991; Hansen y col. 2002).

Aunque muchos grupos científicos han investigado la eficiencia y se ha considerado tanto desde un punto de vista fisiológico como biomecánico, todavía existe un conocimiento muy escaso sobre cómo este componente puede cambiar con el

entrenamiento. La eficiencia mecánica del pedaleo se ha valorado en ciclistas en laboratorio a intensidades submáximas (200 a 300 W) con mejoras del 2-3% en los ciclistas profesionales respecto a los ciclistas aficionados atribuidas a menores fuerzas de impulso negativo e incremento de la potencia en el tobillo (García-López y col. 2009), pero son muy pocos los que la han analizado sobre el terreno (Candotti y col. 2007, Nimmerichter y col. 2015) observando en ciclistas de categoría amateur una disminución de la eficiencia del 20,6% al 18,1% al aumentar la cadencia de pedaleo de 60 a 90 rpm, así como de pedalear en terreno llano (20,0%) respecto a en subida (18,7%), siendo atribuidas estas diferencias a cambios en los patrones de actividad muscular. La información es muy limitada sobre los mecanismos que podrían llevar a un aumento o reducción del coste energético del movimiento. Por otro lado, algunos investigadores han especulado que el tamaño corporal y la estructura muscular son componentes clave, aunque puede haber más factores que contribuyan. El tamaño podría estar relacionado con la masa de las extremidades y el coste asociado al movimiento cíclico de las piernas durante horas. Teóricamente, este hecho serviría para diferenciar ciclistas altos y bajos. En términos de fatiga y disipación de calor, la menor superficie en relación al masa corporal supondría unos mayores costos fisiológicos en competiciones con calor o con circulación de aire limitada.

1.8.1 Eficiencia mecánica bruta y contrarreloj

Si los datos presentados en el modelo de Joyner y Coyle (2008) fueran analizados mediante un perfil de velocidad sobre un cicloergómetro, el ciclista con una eficiencia bruta del 16% estaría circulando a una media de 6 km/h inferior a la velocidad

del ciclista con una eficiencia bruta del 24%, a un similar consumo de oxígeno. Dado este ejemplo, está claro que una baja eficiencia conllevará mayores valores de lactato y consumo de oxígeno para una potencia establecida previamente. Estos factores pueden predecir el desarrollo de una contrarreloj, siendo componentes en el modelo críticos tanto desde un punto de vista teórico como práctico. Hay muy pocos datos de cambios de eficiencia durante el ejercicio y sin embargo está comprobado que los consumos de oxígeno crecen durante el ejercicio realizado durante un periodo largo de tiempo en comparación con el momento de su inicio.

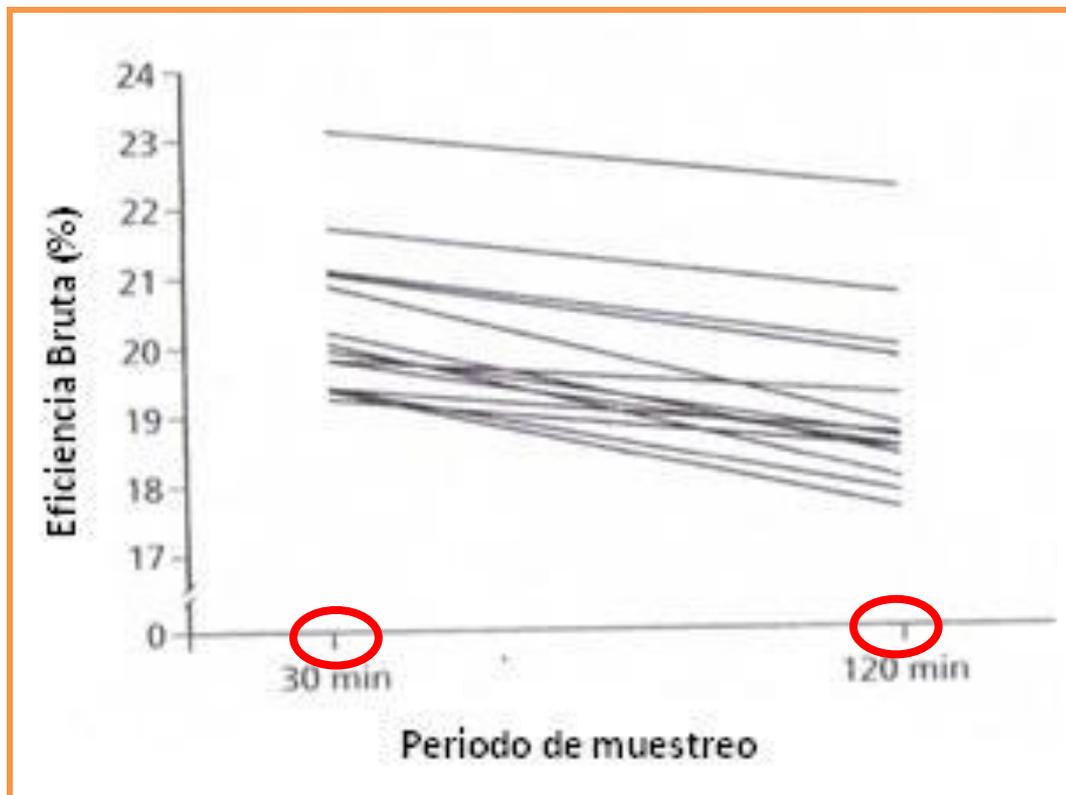


Figura 7. Eficiencia bruta en ciclistas entrenados. Estudio durante un periodo de 2 horas en cicloergómetro.

La figura 7 extraída del estudio de Hopker y col (2009) muestra claros cambios dentro de un grupo de ciclistas desde el minuto 20 hasta el minuto 120 durante un

ejercicio en cicloergómetro. Todos los ciclistas mostraron una reducción en la eficiencia y, como regla general, podría parecer que tener una alta eficiencia en el minuto 30 conlleva presentar un mayor valor de eficiencia en el minuto 120, pues hay una gran correlación entre las medidas a los 30 minutos y a los 120 minutos. A pesar de esta gran correlación, que explica aproximadamente el 85% de las cifras finales basadas en la cifra inicial, se dan cambios en el orden dentro del grupo, con un gradiente de líneas más pronunciadas para algunos ciclistas, principalmente los que se agotan más rápidamente. Por ello, un contrarrelojista debería tener muy en cuenta este componente del modelo para optimizar sus valores en los primeros instantes y también minimizar la caída de este parámetro al final del ejercicio, pues parece estar relacionado con la resistencia muscular.

1.8.2 Eficiencia mecánica bruta y carreras en ruta

Para lograr el mejor resultado posible en una carrera en ruta, los picos de rendimiento son necesarios en momentos puntuales de la carrera, como por ejemplo, un final al esprint, un ataque o enlazar con un grupo. Sin embargo, minimizar el estrés fisiológico durante todas estas fases de la carrera no está controlado, siendo un factor clave a tener en cuenta y que no está recogido en el modelo. Según el modelo de Joyner y Coyle (2008), en los periodos donde otros ciclistas están marcando el ritmo y la intensidad de la carrera, lo ideal sería no tener que comprometer un porcentaje muy grande del consumo máximo de oxígeno ni de la acumulación del lactato trabajando con el menor aporte energético por parte del sistema anaeróbico y la máxima eficiencia a partir de la energía utilizada. Para lograr esto, es fundamental asegurarse de tener la técnica y táctica apropiadas, es decir, controlar los desarrollos, ir a rueda, la posición en

el pelotón y demás aspectos técnicos y tácticos, pues son factores que influyen considerablemente en el devenir de las pruebas deportivas y en la respuesta fisiológica. En cuanto a la preparación previa a una carrera, asegurarse de que estos factores se encuentran en su máximo nivel posible ayudará a conseguir un costo fisiológico relativo menor durante los periodos de ejercicio en que uno mismo no puede decidir la intensidad de trabajo, y a maximizar la producción de trabajo mecánico cuando sea necesario.

El empleo de nuevas técnicas de cálculo y modelización permiten realizar comparaciones de métodos (Simões y col. 2009) para estimar los picos de potencia (González-Haro y col. 2008), para realizar estimaciones de potencia mecánica (González-Haro y col. 2007), comparar la potencia que se desarrolla sentado o de pie (Millet y col. 2002) y el consumo de oxígeno y cadencia en dichas posturas (Harnish y col. 2007), exactitud de los potenciómetros (Millet y col. 2014) siempre con el objetivo primordial de mejorar la eficiencia deportiva (Hansen & Waldeland 2008, Emanuele & Denoth 2012). Además permite favorecer la salud del ciclista mediante la optimización de su esfuerzo mediante la conversión directa en trabajo o potencia de su aprovechamiento máximo del movimiento muscular.

1.9. CICLISMO EN RUTA Y EN PISTA

1.9.1. Reseña histórica

La bicicleta se desarrolló en el siglo XIX en Francia e Inglaterra de manera simultánea. Fue en 1816 cuando un inventor alemán creó un artilugio de madera con una rueda delantera de acero que no tenía pedales, por lo que se impulsaba mediante los pies. Lo que se hizo al principio para aumentar la velocidad fue aumentar el tamaño de la rueda delantera. En 1839 el escocés Macmillan añadió al diseño los pedales y la cadena con la rueda trasera. El auge fue rápido: tres años más tarde ya había carreras en diferentes lugares de Europa y desde entonces el ciclismo no ha dejado de crecer. Las carreras más importantes atraen a decenas de millones de espectadores y son vistas por telespectadores de todo el mundo.

El ciclismo tal y como lo conocemos hoy en día surgió a partir de 1890. Entre 1890 y 1900 nacieron grandes pruebas, que con el paso de los años se han convertido en clásicas, algunas todavía existentes hoy, como la Lieja-Bastogne-Lieja. En 1893 se llevó a cabo el primer Campeonato Mundial, contando con pruebas de velocidad y medio fondo, exclusivo para corredores aficionados del mundo. Las primeras pruebas en España surgirían de un colectivo de fabricantes de bicicletas de Eibar durante la República. Desde 1932 a 1936 se celebró la Eibar-Madrid-Eibar (Gran Premio República) en 4 etapas, antesala de la 1ª Vuelta Ciclista a España en la que participaron 50 ciclistas con un recorrido de 3425 km y 14 etapas en el año 1935.

El ciclismo es un deporte que engloba diferentes especialidades que tienen en común el uso de la bicicleta, y todas ellas están regidas por un organismo común internacional, la Unión Ciclista Internacional (UCI).

1.9.2. Ciclismo en ruta

La primera carrera se remonta oficialmente al 31 de mayo 1868, en el “Parc de Saint-Cloud” de París, y con un recorrido de 1200 m fue ganada por el ciclista británico James Moore. La primera carrera de una ciudad a otra tuvo lugar el 7 de noviembre 1869: París-Rouen. James Moore también fue el ganador y realizó los 123 km en 10 h 25 min.

La popularidad de este deporte le ha permitido formar parte del programa de los Juegos Olímpicos desde su primera edición en 1896, tanto en carretera como en pista. Desde 2008 la bicicleta de montaña y el BMX son también disciplinas olímpicas.



Miguel Induráin en el Tour de Francia

A principios del siglo XX nacieron grandes carreras como el Tour de Francia (1903) y Milán-San Remo (1907). Los primeros Campeonatos del Mundo de Fondo en carretera se celebraron en 1927. Actualmente suelen desarrollarse sobre un circuito de entre 12 y 17 km, con un recorrido total de aproximadamente 260 km. La especialidad de contrarreloj individual se introdujo en el programa de los Campeonatos del Mundo en 1994 y se disputa para los profesionales sobre una distancia de 45 a 50 km.

Las mujeres tuvieron que esperar hasta los Juegos Olímpicos de Los Ángeles 1984 para poder participar en competiciones de carretera.

El ciclismo en ruta se caracteriza por disputarse sobre asfalto. Dentro del ciclismo en ruta profesional existen las siguientes pruebas:

- Prueba en línea de un día. Las pruebas de este tipo de mayor éxito y tradición se denominan Clásicas.
- Prueba por etapas. Se disputan en un mínimo de dos días con una clasificación por sumatorio de tiempos. Se componen de etapas en línea y etapas contrarreloj. Destacan las grandes vueltas por etapas de tres semanas de duración, como la Vuelta a España, Giro de Italia y la más prestigiosa carrera del Mundo, el Tour de Francia.
- Prueba contrarreloj individual.
- Prueba contrarreloj por equipos.

1.9.3. Ciclismo en pista

Las competiciones en la modalidad de pista se remontan a finales del siglo XIX. El primer Campeonato Mundial se celebró en 1895, aunque las mujeres no se

incorporaron al programa de los Juegos Olímpicos hasta 1988. Las pruebas se disputan en el interior de un velódromo con una superficie oval de aproximadamente 250 m peraltada especialmente en las curvas (42 grados) y con bicicletas de pista que no tienen frenos ni cambios, tienen piñón fijo y el eje de pedalier está más alto.

Las modalidades son Keirin; Kilómetro y 500 m contrarreloj; Velocidad individual y por equipos; Persecución individual y por equipos; Mádison; Carrera por puntos; Scratch y Ómnium (vuelta lanzada de 250 m contrarreloj; prueba por puntos sobre 10 o 15 kms; persecución individual de 2 o 3 km; kilómetro o 500m con salida parada; eliminación con 24 ciclistas, en la que cada dos vueltas se elimina el último ciclista; y scratch sobre 5 o 7,5-15 km) según sea hombres o mujeres.



Ciclismo en pista modalidad persecución

1.10. RESUMEN BIBLIOGRÁFICO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Las competiciones en ruta duran entre una hora (Cto. Mundo CRI) y unas 100 horas (Tour de Francia). Aunque las clasificaciones de las competiciones son individuales no hay duda de que es un deporte de equipo. Los ciclistas profesionales presentan una gran variabilidad en sus características antropométricas, pero siempre con una extraordinaria capacidad aeróbica (potencia máxima aeróbica entre 375 y 575 W, consumo de oxígeno entre 4,4 y 6,4 L/min y una potencia a la intensidad OBLA entre 300 y 475 W). La gran variación en las características antropométricas ha llevado a que surjan especialistas en cada tipo de terreno. Y a ese respecto, potencias relativas al peso y exponente al 0,32 y 1 son los mejores indicadores del rendimiento deportivo en los rodadores y en los escaladores, respectivamente. Sin embargo, los especialistas en contrarreloj podrían tener las mejores condiciones en cualquier terreno (llano y subida) y formas de competición (individual y por equipos). En función de la frecuencia cardíaca en competición, las contrarrelojes son las competiciones bajo condiciones más estables, y así las más cortas son realizadas a intensidades próximas al OBLA (400 a 420 W) y las más largas próximas al umbral de lactato individual (350 a 370 W). Las carreras por etapas, son realizadas a intensidades bajas (225 W para las llanas, 275 W para las de alta montaña) pero están caracterizadas por sus intervalos propios donde los ciclistas mantienen una media de 30 a 100 minutos alrededor del umbral aeróbico individual y 5 a 20 minutos alrededor del OBLA.

Los ciclistas profesionales en ruta con frecuencia son valorados en laboratorio para diagnosticar sus cualidades fisiológicas. Sin embargo, ellos prefieren realizar test específicos de campo con sus propias bicicletas a los test de laboratorio en bicicletas ergométricas, método válido para evaluar las cualidades fisiológicas y el rendimiento deportivo (Padilla y col. 1996). La respuesta al ejercicio no depende del tipo de resistencia que se impone al ciclista (fricción en la bicicleta ergométrica y del aire y rodadura en el test de campo). Cuando los ciclistas son valorados en laboratorio, los parámetros fisiológicos expresados en relación a sus características antropométricas predicen su rendimiento deportivo mejor que expresado en relación a valores absolutos (Padilla y col. 1999). La comparación entre métodos también sirve para determinar cuáles de ellos son mejores para determinadas circunstancias, por ejemplo la comparación de ergómetros (Siedlik y col. 2015) sirve para valorar la precisión de los mismos para cuantificar determinados parámetros; la comparación entre diferentes test en velódromo (García-López y col. 2014), así como el estudio comparativo entre test de laboratorio y de campo (Karsten y col. 2014), permiten acercarse a la realidad fisiológica del ciclista de forma más completa.

1.10.1. Características físicas

El amplio margen que existe en las características físicas de los ciclistas profesionales juega un papel importante en el rendimiento deportivo en los diferentes tipos de terreno de la carrera. Estas características incluyen altura (media 180 cms, rango 160 a 190 cms), masa corporal (media 68 kg, rango 53 a 80 kg), superficie corporal (media 1,87 m², rango 1,54 a 2,08 m²), área frontal (media 0,35 m², rango 0,28

a 0,38 m²) (Padilla y col. 1999, Padilla y col. 2000), porcentaje graso (media alrededor 8%, rango entre 6,5 y 11,3%) (Lucía y col. 1999, Fernández-García y col. 2000).

La edad media está entre los 21 años los neo-profesionales y 34 años los profesionales más experimentados.

1.10.2. Características fisiológicas máximas

Los ciclistas profesionales recorren entre 25.000 y 35.000 km al año, sumando sesiones de entrenamiento y pruebas de competición (Pinot & Grappe 2015). Una de sus características más reconocidas es su elevada capacidad aeróbica, como muestran sus elevadas potencias aeróbicas máximas (W_{max}) y sus consumos máximos de oxígeno (VO_{2max}) descritos en investigaciones previas (Lucía y col. 1998, Padilla y col. 1999, Lucía y col. 1999, Padilla y col. 2000, Fernández.-García y col. 2000, Santalla y col. 2012). Valorados los ciclistas en bicicletas ergométricas de freno mecánico y usando incrementos de carga cada 4 minutos, las W_{max} se encuentran en un rango entre 350 y 525 W (5,7 y 6,8 W/kg) (Padilla y col. 1999, Padilla y col. 2000). Estos mismos individuos presentaban valores de VO_{2max} entre 4,4 y 6,4 L/min (69,7 a 84,8 ml/kg/min), frecuencias cardíacas máximas (FC_{max}) de 187 a 204 lat/min, y lactato máximo en sangre al finalizar el test progresivo máximo de 6,9 a 13,7 mmol/l (Padilla y col. 1999, Padilla y col. 2000). Sin embargo, si los datos son comparados con los obtenidos en bicicletas ergométricas con freno electromagnético debe añadirse un 9% por el efecto de fricción del sistema transmisión de la bicicleta Monark (Åstrand 1970).

1.10.3. Características fisiológicas submáximas

El ciclista profesional de carretera presenta características fisiológicas como el umbral de lactato individual (LT) a potencias de 334 W (76% W_{max}), un consumo de oxígeno de 4,0 l/min (77% VO_{2max}) y una frecuencia cardíaca de 163 lat/min (84% FC_{max}) descritas en los estudios (Padilla y col. 1999, Mujika & Padilla 2001). Los valores a la intensidad OBLA son 386 W (87% W_{max}), 4,5 L/min (86% VO_{2max}) y 178 lat/min (92% FC_{max}), respectivamente (Padilla y col. 1999, Padilla y col. 2000). Un estudio Padilla y col. del año 2000 refiere de un 5 veces ganador del Tour de Francia potencias al OBLA de 505 W (después de añadir la corrección del 9% por fricción) y un consumo de oxígeno (VO_2) de 5,65 l/min. Los ciclistas profesionales de ruta presentan una eficiencia mecánica media del 23% (rango 21,5 y 24,5%) (datos no publicados). Estudios recientes han descrito el umbral individual anaeróbico y el segundo umbral ventilatorio (caracterizado por un incremento en VE/VO_2 y VE/VCO_2) en ciclistas profesionales de carretera al 88-90% VO_{2max} (Lucia y col. 1998, Lucia y col. 1999, Fernández-García y col. 2000).

1.10.4. Comparativa de valores entre especialistas

Los ciclistas profesionales realizan esfuerzos en gran variedad de terrenos (llano, subida y descenso) y circunstancias de competición diferentes (individuales o en grupo detrás de otros ciclistas). En cada una de estas circunstancias, el rendimiento está determinado por sus características antropométricas. Así, la masa corporal es el factor más importante en subida debido a la resistencia dependiente de la gravedad, mientras que la superficie frontal es la que más afecta cuando el ciclista pedalea en terreno llano

por la influencia de las resistencias aerodinámicas (Swain y col. 1987). Las diferentes características morfológicas de los ciclistas han contribuido a la aparición de los especialistas morfotipo-dependientes que claramente se distinguen a lo largo de las diferentes fases de la carrera. Estos incluyen a los rodadores como aquellos que ayudan al control de la carrera en terreno llano; los escaladores que trabajan para el equipo principalmente en las subidas de montaña; todo terreno que realizan su trabajo en cualquier tipo de terreno; contrarrelojistas los que destacan de manera individual y los esprinters que disputan las victorias en las carreras principalmente llanas. Cada uno de estos grupos de especialistas tiene unas características antropométricas, fisiológicas máximas y fisiológicas submáximas.

1.10.5. Características antropométricas

Los escaladores tienen una superficie corporal media aproximada ($1,76 \text{ m}^2$) y área frontal ($0,33 \text{ m}^2$) menor y son más ligeros que el resto de los especialistas, aproximadamente 62 kg. En subida de montaña las velocidades más bajas minimiza la influencia de las resistencias aerodinámicas, por lo que estos valores parecen dar una ventaja a estos especialistas en este tipo de terreno. Por otro lado, los ciclistas más altos y pesados con BSA/masa y FA/masa relacionado con menores resistencias aerodinámicas en relación a la masa, y por lo tanto menor costo de energía por unidad de masa tienen mejor rendimiento en superficies llanas (Swain y col. 1987). Por todo esto referir los parámetros fisiológicos en relación a valores antropométricos va a predecir su rendimiento en los diferentes terrenos.

1.10.6. Valores fisiológicos máximos

Los rodadores son el grupo con mayores W_{\max} y $VO_{2\max}$ en valores absolutos y similares a los de los contrarrelojistas. Sin embargo, referido a su masa los escaladores muestran los valores más elevados (6,5 W/kg y 80,9 ml/kg/min) y similares a los contrarrelojistas. Cuando W_{\max} lo expresamos en relación a la masa y exponente al 0,32 y 0,79 (sugerido por Swain 1994) como predicción del rendimiento en llano y en subida o referido al área frontal los valores más elevados son observados en los contrarrelojistas. Podemos concluir por ello que este grupo tiene ventaja respecto a los otros grupos en todos los terrenos (Padilla y col. 1999).

1.10.7. Valores fisiológicos submáximos

Puesto que las carreras no se disputan siempre a intensidad máxima es interesante ver las características de los diferentes grupos a intensidades submáximas. El grupo de contrarrelojistas presenta las mayores potencias al LT y OBLA cuando estos valores son expresados en términos absolutos, referidos a la masa, masa exponente al 0,32 y 0,79, área frontal y como porcentaje de W_{\max} . Como es esperado los rodadores tienen valores similares en términos absolutos y masa exponente al 0,32 lo cual es indicativo de similar rendimiento en terreno llano. Los escaladores muestran valores similares a los contrarrelojistas cuando es referido a la masa. Además diversos autores sugieren que las potencias a LT y OBLA pueden ser usadas como predictor de rendimiento y establecer intensidades de ejercicio durante las pruebas de contrarreloj y por etapas (Padilla y col. 1999, Lucia y col. 2004).

1.10.8. Características de los diferentes tipos de pruebas de ruta

Conocer las características de los diferentes tipos de pruebas en el ciclismo en ruta permite optimizar su entrenamiento y rendimiento. Resulta un tarea difícil por las dificultades técnicas inherentes a la determinación del VO_{2max} y lactato en sangre durante la competición, por lo cual son otros dos métodos los que principalmente se utilizan para cuantificar la intensidad de ejercicio. Así, pulsómetros y potenciómetros aportan por su exactitud una ventaja para medir la intensidad en cada momento de competición y su fácil relación con los valores previos obtenidos en laboratorio mediante la frecuencia cardíaca y potencia individuales (Banister, 1991, Palmer y col. 1994, Jeukendrup y col. 1998, Padilla y col. 1999, Lucia y col. 1999, Feranández-García y col. 2000, Palmer y col. 2000, Mujika & Padilla 2001).

1.10.9. Pruebas contrarreloj

En una etapa prólogo (7,3 km, llana) se alcanzan % FC_{max} superiores al 92%; 114% sobre la FC LT y 100% FC OBLA. En una etapa de contrarreloj corta (28 km, llana) se alcanzan % FC_{max} superiores al 85%; 108% sobre la FC LT y 95% FC OBLA. En una etapa de contrarreloj por equipos (67 km) se alcanzan % FC_{max} superiores al 82%; 105% sobre la FC LT y 92% FC OBLA. En una etapa de contrarreloj larga (49 kms) se alcanzan % FC_{max} superiores al 80%; 103% sobre la FC LT y 90% FC OBLA. Y en una etapa de cronoescalada (40 km con un desnivel de 500 m) se alcanzan %

FC_{max} superiores al 78%; 101% sobre la FC LT y 88% FC OBLA. Teniendo en cuenta el tiempo total realizado por encima del FC LT y FC OBLA (como cantidad de impulsos de entrenamiento, o TRIMP¹) propuesto por Banister (1991) concluimos que la contrarreloj por equipos es lo más duro y exigente, seguida de la cronoescalada, contrarreloj larga, contrarreloj corta y por último la prólogo. Estas diferencias encontradas entre los diferentes tipos de contrarreloj no están reflejadas por la velocidad media realizada. Padilla y col. (2000) sugieren que las FC LT y FC OBLA podrían ser valiosas para determinar los ritmos adecuados para un tipo de prueba por encima y por debajo de 30 minutos. Sin embargo, se ha demostrado que ciclistas con talento deportivo excepcional son capaces de mantener intensidades por encima del OBLA durante 60 minutos.

Fernández-García y col. (2000) describen FC de 171 lat/min y 17 minutos de ejercicio anaeróbico durante la contrarreloj con una media de 38 minutos de duración, valores que coinciden con los descritos por Padilla y col. (2000) en las contrarreloj cortas (172 lat/min y 16 min alrededor del FC OBLA). Es importante señalar que estos valores pueden ser más elevados cuando el ciclista realiza el máximo esfuerzo en una contrarreloj y no está bajo las directrices tácticas de equipo.

¹ TRIMP: Método para cuantificar la carga del entrenamiento propuesto por Banister, basado en el incremento de la frecuencia cardíaca teniendo en cuenta la duración del entrenamiento multiplicado por un factor de intensidad diferente para cada sexo.

1.10.10. Pruebas por etapas

Diversos estudios han utilizado los pulsómetros para analizar las intensidades de ejercicio y carga en las pruebas por etapas (Lucia y col. 1999, Fernández-García y col. 2000, Padilla y col. 2000, Padilla y col. 2001, Padilla y col. 2008). En uno de estos estudios (Padilla y col. 2001) las etapas eran clasificadas en llanas, media-montaña y alta-montaña en función de los kilómetros en subida y la altimetría, demostrando que la velocidad media refleja exactamente de las demandas fisiológicas de la prueba. Así, las etapas más rápidas en llano (40 km/h) y las etapas más lentas de alta-montaña (32,5 km/h) se corresponden con medias de FC más bajas (119 lat/min) en las primeras que en las segundas (135 lat/min). Se observaron medias del 51, 58 y 61% FC_{max} ; 57, 65 y 69% FC LT y 65, 74 y 79% FC OBLA en las etapas llanas, media-montaña y alta-montaña, respectivamente. Se estimaron potencias medias de 192, 234 y 246 W (45, 53 y 57% W_{max}), respectivamente coincidiendo con los datos obtenidos por Vogt y col (2007) durante el Giro de Italia. Asimismo se han descrito 32, 58 y 93 minutos de trabajo alrededor del LT y 6, 13 y 16 minutos de trabajo alrededor de la intensidad OBLA en las etapas llanas, media-montaña y alta-montaña, respectivamente, existiendo una gran variabilidad entre individuos en estos valores dado el diferente papel del ciclista en cada equipo y las condiciones ambientales. La exigencia de las etapas reflejada por la cantidad de TRIMP corresponden a 156, 172 y 215 según sean etapas llanas, media-montaña o alta-montaña, respectivamente. En un estudio posterior Lucia y col. (2003) describen hasta 350 y 500 TRIMP para las etapas llanas y de alta-montaña en el Tour de Francia con FC similares durante el ejercicio y potencias similares en las etapas llanas (200 W) y en subidas de alta-montaña (6 w/kg) medido con el potenciómetro SRM. La

FC es un parámetro válido para estimar la media de potencia realizada en una prueba y confirmado por otros autores cuando se analizan trabajos fraccionados suficientemente largos. Sin embargo, todo esto no refleja exactamente lo que ocurre en el ciclismo en ruta de competición, dado que éste no es realizado siempre en ritmos estables y existen momentos puntuales de máxima intensidad con periodos de recuperación.



Las etapas de montaña llevan al límite la resistencia del ciclista (Giro 2011; 15ª etapa, 229 km, 7h 27min).

2. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2. INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1. OBJETIVOS

Los objetivos principales de los estudios que componen la investigación experimental son los siguientes:

1. Determinar la validez de la intensidad de ejercicio OBLA como método para evaluar la capacidad de resistencia de ciclistas de ruta jóvenes de competición, mediante el análisis de sus respuestas metabólicas y cardiorrespiratorias durante un ejercicio submáximo de 30 minutos a dicha intensidad (Estudio I).

2. Verificar la validez de un nuevo test de velódromo para estudiar las características fisiológicas de ciclistas de ruta amateur de competición y determinar las relaciones entre el rendimiento del ciclista en el velódromo y sus parámetros fisiológicos medidos en el laboratorio (Estudio II).

3. Analizar la precisión de diferentes ecuaciones descritas en la literatura para la estimación del costo metabólico del ciclismo (Estudio II).

4. Correlacionar las capacidades fisiológicas y el rendimiento de los ciclistas de ruta profesionales, en relación con su especialidad en carreras por etapas, dependiendo de su morfotipo (Estudio III).

3. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL i

3.1. ESTUDIO I

3.1. ESTUDIO I. LA INTENSIDAD DE EJERCICIO OBLA COMO CRITERIO DE RESISTENCIA AERÓBICA EN CICLISTAS DE RUTA JÓVENES

3.1.1. Introducción

La resistencia o “endurance” es la capacidad de mantener una potencia determinada durante el mayor tiempo posible, y debe ser determinada de manera fehaciente para establecer programas de entrenamiento en los deportes de larga duración como el ciclismo de ruta. Habitualmente se utiliza el segundo umbral ventilatorio (SV2), también denominado umbral ventilatorio individual (IVT), umbral de compensación respiratoria o umbral de disociación entre la ventilación y el VCO_2 (Wasserman y col. 1973) para determinar el inicio del ejercicio predominantemente anaeróbico, siendo un índice útil para determinar el rendimiento en deportes de resistencia. Este umbral puede identificarse como el segundo punto de ruptura en la respuesta ventilatoria al ejercicio de intensidad creciente y se debe al aumento de la acidosis metabólica (Wasserman y col. 1973).

Del mismo modo, la concentración de lactato en la sangre ([La]) es un índice útil para evaluar el rendimiento aeróbico individual, ya que refleja el metabolismo glucolítico en los músculos esqueléticos activos. Además, los métodos disponibles para medir la [La] son más accesibles y sencillos que el análisis ventilatorio, lo cual facilita su utilización por parte de los preparadores deportivos. Es por esta razón por la que se

utilizan habitualmente diferentes métodos basados en la cinética de la [La] para determinar la resistencia aeróbica de los ciclistas, como por ejemplo el máximo estado estable de lactato (MLSS), el umbral de lactato individual (ILT) o el inicio de la acumulación de lactato sanguíneo (OBLA).

El MLSS corresponde a la carga de trabajo más alta que puede mantenerse sin aumentar más de 1 mmol/l en los últimos 20 minutos en un trabajo a intensidad constante durante 30 minutos (Beneke y col. 2000, Beneke 2003). Se sabe que la determinación de esta intensidad de ejercicio es uno de los métodos más precisos y fiables para evaluar la resistencia aeróbica (Dekerle y col. 2003). Sin embargo, este método tiene la desventaja para preparadores y ciclistas de requerir 3 o 4 sesiones de ejercicio submáximo de 30 minutos a intensidad constante, separadas por un día de reposo total (Beneke y col. 2000, Dekerle y col. 2003). Por este motivo y por razones prácticas, se suelen utilizar otros métodos consistentes en pruebas progresivas para determinar la capacidad de resistencia de manera más rápida y sencilla.

Entre estos otros métodos, el ILT (Ivy y col. 1980) es la intensidad de ejercicio a la cual se produce un aumento no lineal en la [La]. El ILT corresponde a la posición del punto de intersección entre las dos tangentes de regresión en la curva de acumulación de lactato sanguíneo. Se han propuesto diversos métodos geométricos para determinar este umbral, lo cual ha llevado a múltiples interpretaciones del mismo (Bosquet y col. 2002). En efecto, umbrales calculados sobre los mismos datos pero utilizando diferentes técnicas “científicas” pueden ofrecer resultados que van desde el 79 hasta el 92% del consumo máximo de oxígeno (Tokmakidis y col. 1998). Por otra parte, la intensidad de

inicio y finalización del protocolo progresivo de evaluación puede afectar a las tangentes de las regresiones, así como la posición del punto de intersección entre las dos tangentes, haciendo que esta aproximación resulte relativamente arbitraria (Bosquet y col. 2002).

Por esta razón, a veces se prefiere una determinación más sencilla de la intensidad asociada a una [La] predeterminada. El valor 4 mmol/l fue propuesto por Mader y Heck (1976) y posteriormente se ha identificado como la Intensidad de Inicio de Acumulación de Lactato (INT_{OBLA}) como la potencia de ejercicio asociada a una [La] de 4 mmol/l (Sjödín & Jacobs 1981), y se determina habitualmente en la curva [La]-potencia mediante interpolación lineal entre los dos puntos más cercanos de [La]. Durante el ejercicio la concentración de lactato a 4mmol/l se ha relacionado con el MLSS (Heck y col. 1985) e incluso algunos investigadores han propuesto que la INT_{OBLA} es la intensidad de estado estable más alta que puede mantenerse en un ejercicio prolongado (Sjödín & Jacobs 1981, Tanaka & Matsuura 1984, Sjödín & Svedenhag 1985). Padilla y col. indican que el OBLA corresponde al 87% de la potencia aeróbica máxima (PMA), 86% del consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) y 92% de la frecuencia cardiaca máxima (FC_{max}) en ciclistas de ruta profesionales (Padilla y col. 2000).

Así pues, se ha propuesto la INT_{OBLA} como método válido para estudiar las respuestas cardiorrespiratorias y metabólicas al ejercicio submáximo de intensidad constante, y para evaluar el rendimiento de resistencia de un deportista (Kindermann y col. 1979, Stegmann & Kindermann 1982, Hagberg & Coyle 1983, Heck y col. 1985,

Billat y col. 2003, Figueira y col. 2008). Sin embargo, también se ha cuestionado la validez de la INT_{OBLA} como indicador de la máxima intensidad de estado estable que puede mantenerse durante el ejercicio prolongado para todos los individuos, ya que en otros estudios han observado condiciones de estado estable a intensidades de ejercicio diferentes de 4 mmol/l (Ivy y col. 1980, Stegmann & Kindermann 1982, Föhrenbach y col. 1987, Jenkins & Quigley 1990, Beneke y col. 2000, Lee H y col. 2002, Dekerle y col. 2003, Baron y col. 2003, Van Schuylenberg y col 2004, Kilding & Jones 2005).

3.1.2. Material y métodos

3.1.2.1. Sujetos

Participaron en este estudio ocho ciclistas masculinos de ruta de primer año en la categoría amateur y nivel nacional. Previamente a su participación los ciclistas dieron su consentimiento informado por escrito, tras ser debidamente informados sobre los detalles de los procedimientos experimentales y los posibles riesgos asociados a su participación en el estudio. La media de edad, masa corporal y altura de los ciclistas fue de 18 ± 1 años, $74,5 \pm 4,5$ kg y $180,3 \pm 5,8$ cm, respectivamente. Los ciclistas entrenaban aproximadamente 350 km a la semana en las fechas en que se llevó a cabo el estudio. Cada deportista acudió en dos ocasiones al laboratorio en un periodo de 4 a 7 días, para llevar a cabo una prueba de ejercicio progresivo hasta intensidad máxima y una prueba de ejercicio continuo a intensidad submáxima. Todos los ciclistas estaban familiarizados con los procedimientos de valoración antes de dar comienzo a los experimentos.

3.1.2.2. Test de ejercicio progresivo máximo

La primera sesión de valoración consistió en un test de ejercicio progresivo máximo para determinar el VO_{2max} . El test se llevó a cabo en un cicloergómetro de freno mecánico (Monark 818 E, Varberg, Suecia). La potencia inicial se estableció en 100 W, y fue aumentando 18 W cada 3 minutos hasta el agotamiento. Se intercalaron periodos de recuperación de 1 minuto entre las diferentes cargas de ejercicio. La cadencia de pedaleo se mantuvo constante a 70 rpm durante todo el test, con la ayuda de un metrónomo. Se registró continuamente la frecuencia cardiaca durante el test (Sport Tester PE 3000, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia), y se determinó el valor de frecuencia cardiaca de estado estable calculando la media del último minuto a cada intensidad de ejercicio. Durante los primeros segundos de recuperación tras cada carga de ejercicio se obtuvo una muestra de sangre de 25 μ l del lóbulo de la oreja previamente hiperemizado (Finalgon, Laboratorios FHER, Barcelona), para determinar la concentración de lactato sanguíneo [Lactate Analyser 640, Roche Bioelectronics, Hoffman-La Roche, Basel, Suiza (Geysant y col. 1985)]. Para medir la ventilación, el VO_2 y las fracciones de O_2 y CO_2 durante el test de ejercicio los ciclistas respiraron a través de una válvula de baja resistencia (Hans Rudolph 2700, Kansas City, MO, EE. UU.) conectada a un pneumotacógrafo y un sistema de análisis de gases (Ergoxyscreen, E. Jaeger, Würzburg, Alemania). El pneumotacógrafo y los analizadores de gases se calibraron antes de que cada ciclista realizara el test, utilizando una jeringa de volumen conocido y gases de composición conocida analizados mediante la técnica de Schölander, respectivamente. El VO_2 se monitorizó durante los últimos 30 s de cada

intensidad de ejercicio. El test continuó hasta que los sujetos llegaron al agotamiento voluntario (incapacidad de mantener la cadencia de pedaleo requerida). Los valores registrados durante la última carga de ejercicio y mantenidos durante al menos 2 minutos completos se consideraron máximos. Los ciclistas recibieron ánimos verbales durante el test.

Tras el test de intensidad progresiva se determinó la INT_{OBLA} de cada ciclista mediante interpolación lineal entre el punto correspondiente a una concentración de lactato de 4 mmol/l en la curva de acumulación de lactato sanguíneo y la potencia correspondiente. Además, se calcularon también el umbral de lactato individual (ILT) (Hagberg & Coyle 1983) y el umbral ventilatorio individual (IVT) (Wasserman 1973) para cada ciclista.

3.1.2.3. Test de ejercicio submáximo a intensidad constante

La segunda sesión de evaluación consistió en un ejercicio de pedaleo de 30 min a intensidad constante en el mismo cicloergómetro utilizado previamente para el test de intensidad progresiva, y a una frecuencia de pedaleo similar (70 rpm). La carga de trabajo se estableció para cada ciclista (INT_{OBLA} individual). Se midieron la frecuencia cardiaca, VO_2 , ventilación, fracciones de gases y concentración de lactato sanguíneo a los minutos 5, 10, 15, 20, 25 y 30 de este ejercicio a intensidad constante, utilizando los métodos descritos anteriormente. Durante este test, los valores registrados en el minuto 10 de ejercicio se tomaron como valores de referencia de estado estable, como se ha sugerido previamente (Beneke y col. 2000, Dekerle y col. 2003, Baron y col. 2003).

3.1.2.4. Análisis estadísticos

Se realizaron comparaciones entre grupos con el test t de Student. Las comparaciones entre grupos no se basaron en una distribución de muestras aleatoria real, ya que la separación de los ciclistas no fue diseñada de antemano. Sin embargo, el único sesgo de esta separación fue el tiempo crítico que los ciclistas era capaces de mantener INT_{OBLA} . Se aplicaron ANOVA y comparaciones post-hoc de Scheffé para analizar la evolución de las variables cardiorrespiratorias y metabólicas a lo largo del test de intensidad constante, y para comparar los valores a INT_{OBLA} , ILT e IVT. Se eligió el nivel de probabilidad $P < 0,05$ como criterio de significancia estadística.

3.1.3. Resultados

3.1.3.1. Test de ejercicio progresivo máximo

Las principales características físicas, valores cardiorrespiratorios y metabólicos máximos de los dos grupos de ciclistas se muestran en la Tabla 1. Todas las diferencias entre grupos fueron no significativas. Frecuencia cardiaca, VO_2 , concentración de lactato sanguíneo y potencia a INT_{OBLA} , ILT e IVT no fueron diferentes entre G30 y G20, ni en valores absolutos ni expresados en porcentaje de los valores máximos (Tabla 1). Para el conjunto de los ciclistas, los valores de frecuencia cardiaca absolutos fueron mayores a INT_{OBLA} e IVT que a ILT ($P < 0,001$ y $P < 0,01$ respectivamente), pero no hubo diferencias entre INT_{OBLA} e IVT, ni tampoco entre los tres diferentes umbrales en

valores porcentuales de la frecuencia cardiaca máxima. Asimismo, VO_2 fue superior a INT_{OBLA} e IVT que a ILT, tanto en valores absolutos como en porcentaje de VO_{2max} ($P < 0,001$ y $P < 0,01$ respectivamente). Se observaron las mismas diferencias significativas en lo que respecta a la concentración sanguínea de lactato y los valores de potencia, con una diferencia adicional entre INT_{OBLA} e IVT en valores absolutos ($P < 0,01$) y en porcentaje de los valores máximos ($P < 0,05$) de concentración de lactato sanguíneo (Tabla 2).

Tabla 1: Valores físicos y fisiológicos máximos de los ciclistas que completaron el ejercicio de 30 min a intensidad constante (G30) y los que se detuvieron al cabo de 20 ± 2 min (G20). VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno. VE_{max} : ventilación máxima. RER: ratio de intercambio respiratorio. Todas las diferencias fueron no-significativas.

| | Grupo | |
|--|------------------|------------------|
| | G30 | G20 |
| Edad (años) | 18,0 \pm 0,0 | 18,8 \pm 1,0 |
| Peso (kg) | 76,0 \pm 3,6 | 73,0 \pm 5,3 |
| Altura (cm) | 183,4 \pm 5,5 | 177,3 \pm 4,7 |
| Frecuencia Cardiaca _{max} (latidos/min) | 195 \pm 3 | 198 \pm 5 |
| VO_{2max} (l/min) | 4,8 \pm 0,4 | 4,5 \pm 0,6 |
| VO_{2max} (ml/kg/min) | 63,7 \pm 5,1 | 61,5 \pm 5,2 |
| VE_{max} (l/min) | 163,4 \pm 14,1 | 147,5 \pm 20,6 |
| RER _{max} | 1,09 \pm 0,07 | 1,05 \pm 0,05 |
| Lactato _{max} (mmol/l) | 10,2 \pm 3,2 | 11,7 \pm 2,3 |
| Potencia _{max} (w) | 382 \pm 22 | 375 \pm 16 |
| Potencia relativa _{max} (w/kg) | 5,03 \pm 0,31 | 5,14 \pm 0,25 |

Tabla 2: Comparación de variables fisiológicas entre grupos a tres intensidades de referencia. G30: ciclistas que completaron el ejercicio de 30 min a intensidad constante. G20: ciclistas que se detuvieron al cabo de 20 ± 2 min. INT_{OBLA} : intensidad de ejercicio correspondiente al inicio de la acumulación de lactato sanguíneo (4 mmol/l). ILT : umbral de lactato individual. IVT : umbral ventilatorio individual. VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno. VE_{max} : ventilación máxima. RER : ratio de intercambio respiratorio. Todas las diferencias fueron no significativas.

| Intensidad | Grupo | FC_{max} (latidos/min) | $\%FC_{max}$ | VO_2 (ml/kg/min) | $\%VO_{2max}$ |
|--------------|-------|--------------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| INT_{OBLA} | G20 | 181 ± 7 | $91,6 \pm 1,5$ | $52,8 \pm 3,0$ | $86,3 \pm 3,3$ |
| | G30 | 178 ± 7 | $91,2 \pm 2,7$ | $52,0 \pm 2,5$ | $82,1 \pm 8,1$ |
| ILT | G20 | 172 ± 5 | $89,6 \pm 5,5$ | $48,0 \pm 2,6$ | $78,6 \pm 5,5$ |
| | G30 | 171 ± 5 | $87,7 \pm 2,1$ | $48,0 \pm 2,4$ | $73,4 \pm 6,3$ |
| IVT | G20 | 178 ± 8 | $89,9 \pm 2,0$ | $51,0 \pm 4,1$ | $83,1 \pm 4,9$ |
| | G30 | 177 ± 8 | $90,9 \pm 3,0$ | $52,2 \pm 3,0$ | $82,3 \pm 7,5$ |
| Intensidad | Grupo | Lactato (mmol/l) | $\%Lactato_{max}$ | Potencia (watt) | $\%Pot_{max}$ |
| INT_{OBLA} | G20 | $4,0 \pm 0,0$ | $35,0 \pm 6,3$ | 305 ± 12 | $81,5 \pm 1,4$ |
| | G30 | $4,0 \pm 0,0$ | $42,0 \pm 12,2$ | 309 ± 12 | $81,1 \pm 6,8$ |
| ILT | G20 | $2,5 \pm 0,3$ | $21,4 \pm 1,8$ | 280 ± 4 | $74,7 \pm 3,4$ |
| | G30 | $2,5 \pm 0,3$ | $25,9 \pm 4,7$ | 290 ± 8 | $75,9 \pm 3,0$ |
| IVT | G20 | $3,0 \pm 0,4$ | $25,9 \pm 4,7$ | 296 ± 16 | $79,0 \pm 4,6$ |
| | G30 | $3,7 \pm 0,5$ | $38,0 \pm 11,7$ | 309 ± 14 | $81,1 \pm 7,1$ |

3.1.3.2. Test de ejercicio submáximo a intensidad constante

No todos los ciclistas fueron capaces de mantener la INT_{OBLA} durante 30 min. Los ciclistas que completaron el ejercicio submáximo de 30 min fueron incluidos en un grupo denominado “G30” ($N = 4$), mientras que aquellos que no fueron capaces de completar la tarea en su totalidad y detuvieron el ejercicio a los 20 ± 2 min fueron incluidos en el grupo “G20” ($N = 4$).

Durante el test submáximo a intensidad constante se produjo una deriva del lactato sanguíneo en el G20, siendo los valores a los 15 y 20 min más altos que a los 10 min ($P < 0,05$ y $P < 0,001$ respectivamente) (Figura 8). De igual modo, la concentración de lactato fue mayor a los 25 min que a los 10 min en el G30. Además, el lactato sanguíneo fue superior en G20 que en G30 a los 10 ($P < 0,05$), 15 y 20 min ($P < 0,01$).

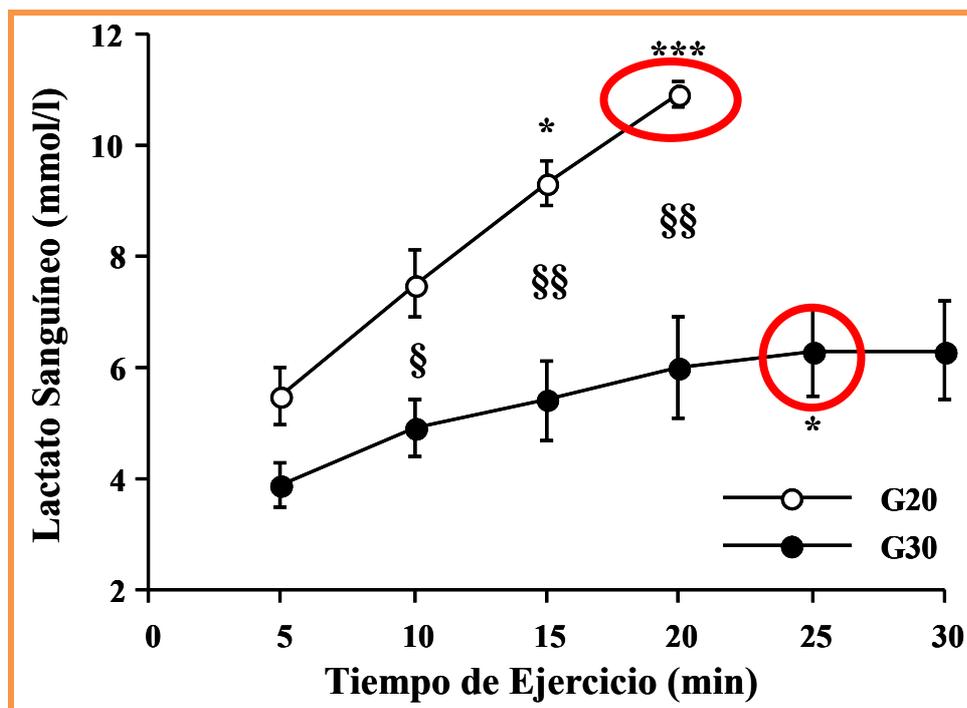


Figura 8. Evolución de la concentración de lactato sanguíneo durante el test de ejercicio submáximo a la intensidad correspondiente al OBLA. * Diferencia significativa con respecto a los 10 min. § Diferencia significativa entre G20 y G30.

La frecuencia cardíaca aumentó continuamente en ambos grupos (Figura 9). Sin embargo, sólo el G20 incrementó significativamente sus valores sobre los obtenidos a los 10 min ($P < 0.05$ and $P < 0.01$ en el minuto 15 y 20, respectivamente). La frecuencia cardíaca fue significativamente mayor en el G20 que en el G30 a los 15 minutos ($P < 0.05$). El consumo de oxígeno no resultó estadísticamente diferente entre los grupos. Sin embargo, mientras permaneció constante en el G20 durante toda la duración del ejercicio, fue significativamente mayor en el minuto 25 ($P < 0.05$) y en el minuto 30 que en el minuto 10 ($P < 0.01$) (Figura 10). La ventilación aumentó continuamente durante el ejercicio y también fue similar en ambos grupos, aunque los valores medios fueron constantemente mayores en el G20 que en el G30 (Figura 11). En el anterior grupo, se observó una diferencia estadística en el minuto 20 ($P < 0.05$), el 25 y el 30 ($P < 0.001$). La relación de intercambio respiratorio no mostró ningún descenso significativo en ambos grupos (Figura 12), presentando el G20 mayores valores que el G30 en los minutos 10 y 20 ($P < 0.05$).

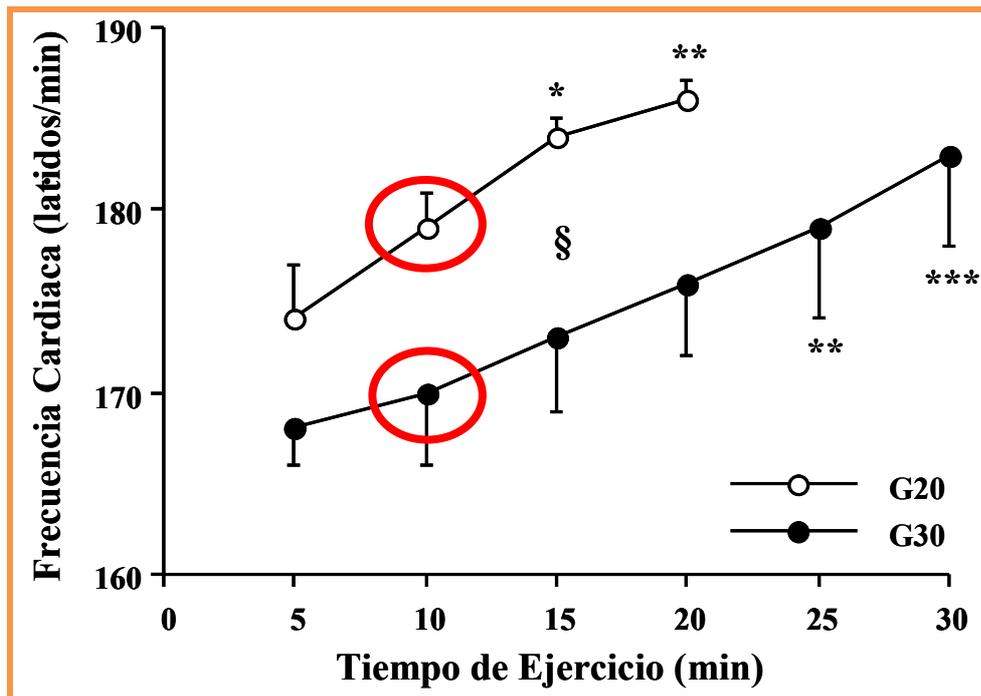


Figura 9. Evolución de la frecuencia cardíaca durante el test de ejercicio submáximo a la intensidad correspondiente al OBLA. * Diferencia significativa con respecto a los 10 min. § Diferencia significativa entre G20 y G30.

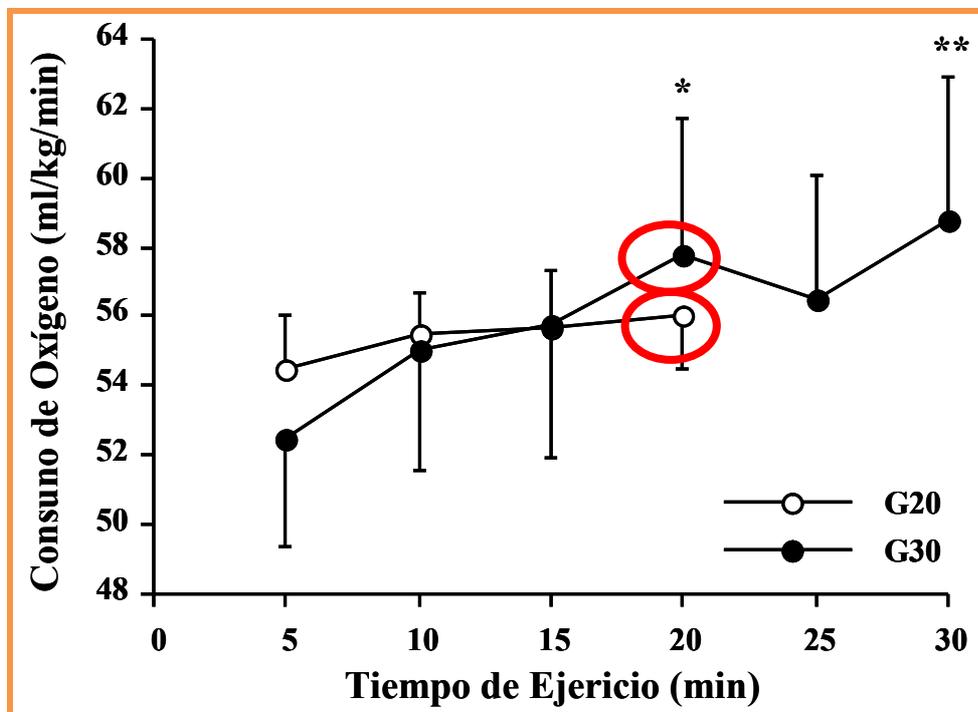


Figura 10. Evolución del consumo de oxígeno durante el test de ejercicio submáximo a la intensidad correspondiente al OBLA. * Diferencia significativa con respecto a los 10 min.

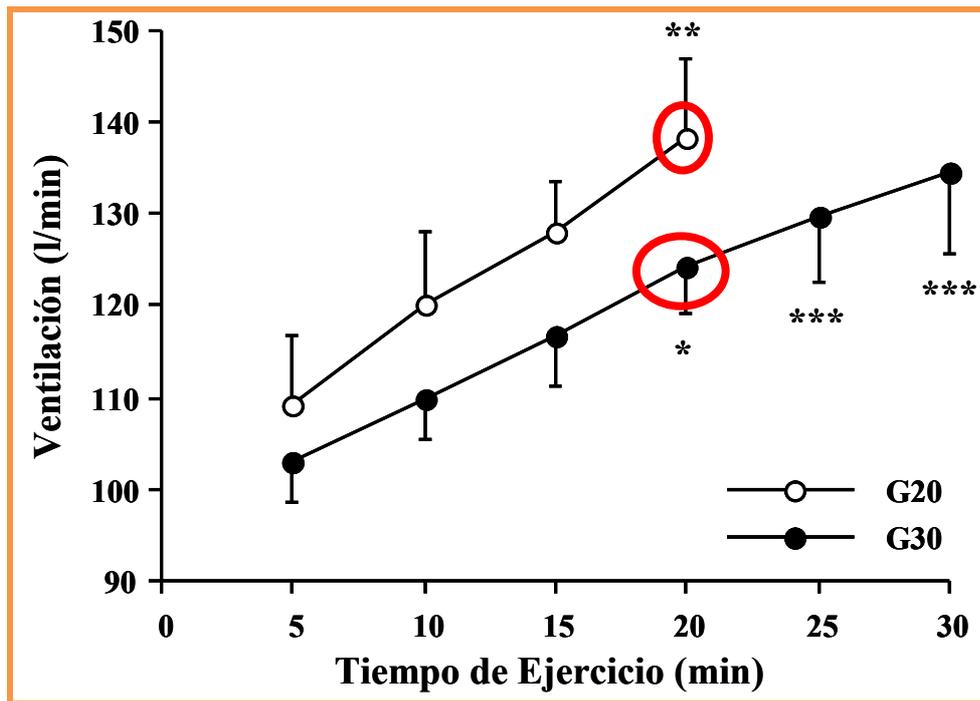


Figura 11. Evolución de la ventilación durante el test de ejercicio submáximo a la intensidad correspondiente al OBLA. * Diferencia significativa con respecto a los 10 min.

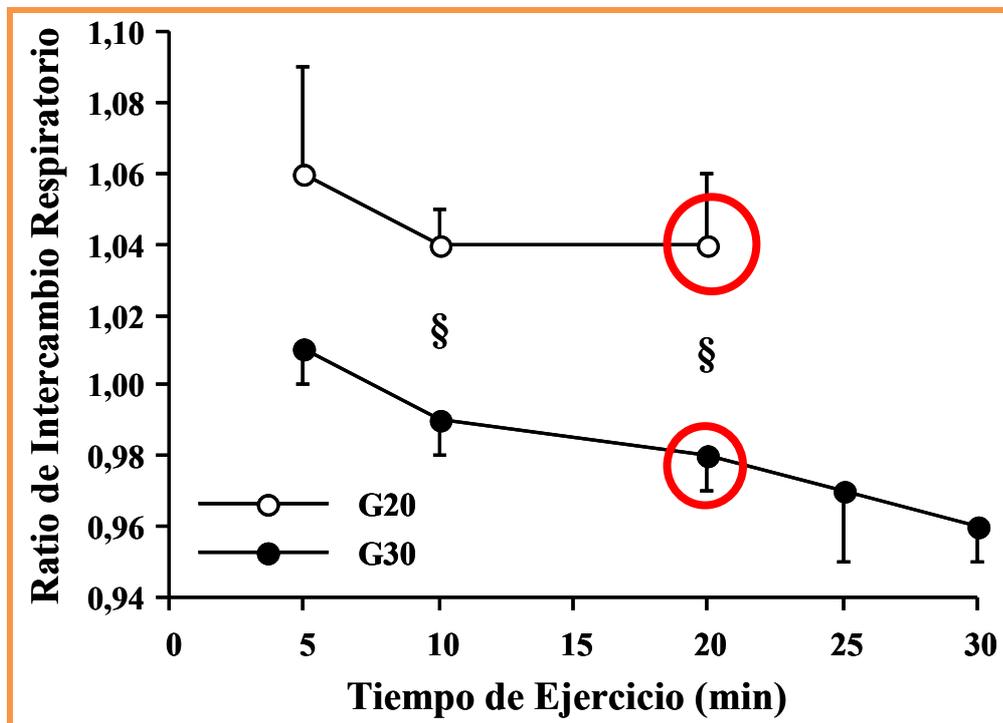


Figura 12. Evolución del ratio de intercambio respiratorio durante el test de ejercicio submáximo a la intensidad correspondiente al OBLA. § Diferencia significativa entre G20 y G30.

3.1.4. Discusión

Los resultados obtenidos en el test progresivo mostraron que la Intensidad de Inicio de Acumulación de Lactato (INT_{OBLA}) estuvo ligeramente por debajo de los valores descritos para ciclistas profesionales de ruta (Bosquet y col. 2002, Brickley y col. 2002, Pinot y col. 2015). Esto podría explicarse por la diferencia de nivel de rendimiento entre ciclistas amateur y profesionales.

No se encontró ninguna diferencia significativa entre INT_{OBLA} e IVT, que ya se sabe que sobreestima el MLSS (Baron y col. 2003), por lo que se puede pensar que el ejercicio llevado a cabo a INT_{OBLA} sobreestima el MLSS que es reconocido como el método más fiable y preciso para determinar la resistencia aeróbica (Baron y col. 2003). Esto está en concordancia con el resultado de estudios previos que mostraban que la desviación de la acumulación de lactato sanguíneo es significativamente mayor que el MLSS en remo (La Fontaine y col. 1981, Hagberg & Coyle 1983) y en ciclismo (Padilla y col. 1999).

Más aún, el resultado más sorprendente del ejercicio constante a intensidad submáxima fue que mientras la determinación de INT_{OBLA} es habitualmente propuesta para evaluar la resistencia aeróbica (Hagberg & Coyle 1983, Figueira y col. 2008), la intensidad no pudo ser mantenida durante 30 minutos por la mitad de los ciclistas jóvenes. De hecho, sólo 4 de los 8 ciclistas fueron capaces de terminar la prueba de 30 minutos a INT_{OBLA} (G30). En este grupo, la FC, el VE y el VO_2 aumentaron entre el minuto 10 y el último minuto de la prueba mientras que el RER descendió durante el

mismo periodo. Sin embargo, incluso en el minuto 30, estos parámetros se mantuvieron alejados de los valores obtenidos al final de la prueba incremental, llevando a pensar que los ciclistas de este grupo podrían ser capaces de mantener esta intensidad durante un largo periodo de tiempo aunque incluso en el G30 la concentración de lactato [La] no se mantuvo estable durante la prueba a INT_{OBLA} mostrando que el ritmo de producción de lactato superaba el ritmo de eliminación del mismo. El análisis aislado de este resultado podría llevar a la conclusión de que el INT_{OBLA} podría ser propuesto para determinar la resistencia aeróbica de estos ciclistas de ruta jóvenes como ya ha sido propuesto por otros autores (Hagberg & coyle 1983, Figueira y col. 2008) sugiriendo que la INT_{OBLA} está ligeramente por encima del nivel de trabajo más alto que puede ser mantenido a lo largo del tiempo sin una acumulación continua de lactato en sangre, también llamado MLSS (Baron y col. 2005).

Los resultados de los ciclistas que no fueron capaces de mantener el ejercicio durante los 30 minutos (G20) confirmaron esta conclusión. Así, los resultados apoyan que la INT_{OBLA} no podría ser empleada para determinar la resistencia aeróbica porque, al menos en la mitad de los ciclistas de ruta jóvenes tuvo lugar una desviación fisiológica y como consecuencia un agotamiento prematuro. De hecho, la [La], la FC y el RER fueron mayores en el G20 que en el G30, a pesar del hecho de que ellos también estaban bien entrenados. El tiempo hasta la extenuación durante la prueba de intensidad submáxima constante fue de 20 ± 2 minutos, cercano a los tiempos obtenidos durante las pruebas llevadas a cabo a potencia crítica (CP) (Sjodin & Jacobs 1981, Padilla y col. 2000), que ha mostrado también no ser significativamente diferente del IVT y sobreestimar el MLSS (Baron y col. 2003). Así, cuando un ejercicio se lleva a cabo a

CP, los parámetros metabólicos, cardiovasculares y ventilatorios alcanzan los valores máximos, mientras que la acidosis producida no puede ser compensada, conllevando a una rápida extenuación (Padilla y col. 2000).

Teniendo en cuenta los resultados del presente estudio, se podría sugerir que si se hubiera empleado un valor predeterminado más bajo de [La], todos los ciclistas hubieran sido capaces de completar la prueba de 30 minutos. Aunque es cierto que una concentración fija de 4 mmol/l es utilizada a menudo (Beneke y col. 2000), otros valores también han sido propuestos y aplicados 2,5 mmol/l (Sjodin & Svedenhag 1985, La Fontaine y col. 1981), 2.2 mmol/l (Stegmann & Kindermann 1982) e incluso Tanaka & Matsuura (1984) y Yoshida (1984) aplicaron 1 mmol/l por encima del nivel basal. Asimismo, cuando la concentración de lactato en sangre para determinar el OBLA fue fijada en 3,5 mmol/l, otros estudios han mostrado que puede ser empleado para estimar el MLSS (Wasserman y col. 1973, Tokmakidis y col. 1998).

Sin embargo, nuestra opinión es que cualquiera que sea el nivel de [La] fijado, el mayor problema de este método parece encontrarse en otro motivo. Esto queda puesto en evidencia por las diferencias en los tiempos de extenuación y las respuestas fisiológicas entre G20 y G30, que sugieren que los estímulos fisiológicos no son los mismos para todos los ciclistas cuando la intensidad de un ejercicio se impone a un valor único de 4mmol/l de [La]. Esto está en concordancia con los estudios que ya han subrayado la variabilidad entre individuos para la transición entre las vías metabólicas aeróbicas y anaeróbicas. De hecho, según Bosquet y col. (2002), utilizando un valor fijo de lactato se aumenta la objetividad pero se elimina la individualidad ya que el

incremento no lineal de la [La] no siempre se inicia a 4 mmol/l. Así mismo, la [La] asociada con el MLSS se ha demostrado que varía considerablemente entre individuos. De hecho, se han publicado rangos que van desde 3,6 a 7,9 mmol/l (Ivy y col. 1980).

Se podría sugerir que la INT_{OBLA} del G30 estaba más cerca de la transición individual de la ruta metabólica predominante aeróbica. Por esta razón, los ciclistas de este grupo fueron capaces de mantener esta intensidad durante toda la prueba de 30 minutos. Por el contrario, se podría asumir que cuando los ciclistas del G20 llevaron a cabo el ejercicio a 4 mmol/l, la deriva fisiológica condujo a la extenuación después de 20 minutos porque su MLSS tiene lugar a menores valores de [La].

Aunque a menudo se propone la determinación de la INT_{OBLA} para evaluar la resistencia aeróbica, esta intensidad no pudo ser mantenida durante 30 min por parte de todos los jóvenes ciclistas de ruta, debido a la aparición de fatiga prematura provocada por un estrés fisiológico importante.

Aunque la determinación de la intensidad de ejercicio correspondiente a una concentración de lactato fija podría tener utilidad a nivel práctico cuando se trabaja con grupos grandes de sujetos no de élite, los resultados de este estudio sugieren que los métodos de determinación individuales deberían prevalecer a la hora de determinar la resistencia aeróbica en grupos reducidos de ciclistas de ruta bien entrenados. Dado que el porcentaje de VO_{2max} a INT_{OBLA} es mayor en el G20 igual que ocurre con los deportistas más entrenados, los resultados obtenidos coinciden con lo descrito por otros autores de un tiempo a la extenuación menor en estos. Mientras la determinación del

MLSS puede ser un método más preciso, requiere realizar un protocolo de 3 o 4 test. En nuestra opinión, sí es necesario determinar la resistencia aeróbica de manera más rápida, el ILT proporciona la mejor estimación del MLSS y puede ser válido para ciclistas de ruta de competición (Jones & Doust 1998).

La cadencia de pedaleo utilizada en este test submáximo (70 rpm) parece ser la más aconsejable dada su edad, ya que se ha comprobado que un mejor nivel condición física y entrenamiento (ciclistas experimentados) permite utilizar cadencias de pedaleo superiores a la cadencia óptima energética (EOC) de 55-65 rpm como pueden ser entre 80-100 rpm (Vercruyssen & Brisswalter, 2010).

4. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL ii

4.1. ESTUDIO II

4.1. ESTUDIO II. VALIDEZ DE UN TEST EN VELÓDROMO PARA CICLISTAS DE RUTA DE COMPETICIÓN

4.1.1. Introducción

Aunque diversos estudios han demostrado la validez de los test de laboratorio para evaluar de manera precisa el potencial fisiológico de los ciclistas (La Voie y col. 1988, Marion & Léger 1988, Seifert & Langenfeld 1988), parece importante tener en cuenta la utilización de equipamientos de evaluación específicos y que le resulten familiares al propio ciclista. Desde hace muchos años el cicloergómetro ha sido el aparato más utilizado para la determinación de los parámetros fisiológicos y biomecánicos del ciclista (Hagberg y col. 1981, Sjøgaard 1984, Coast & Welch 1985, Faria y col. 1989). El rendimiento en estas condiciones está representado por la potencia mecánica, que es el producto de la fuerza de fricción y la velocidad del volante de inercia. La fuerza de fricción se supera mediante fuerzas ejercidas de manera eficiente por las piernas del ciclista sobre los pedales. Esta potencia se mide en vatios.

Por el contrario, en el ciclismo de ruta por terreno llano y en el velódromo el rendimiento viene representado normalmente por la velocidad de desplazamiento del ciclista. En estas condiciones, la potencia mecánica depende en gran medida del tamaño corporal. En efecto, el ciclista debe superar dos tipos de resistencia para generar movimiento: la resistencia a la rodadura y fundamentalmente la resistencia del aire. Se ha demostrado que la resistencia a la rodadura depende de la masa corporal del ciclista,

la presión de inflado de las ruedas, las características de la superficie sobre la que se rueda y de las ruedas; la resistencia del aire por su parte depende fundamentalmente del área frontal del ciclista y su bicicleta, la densidad del aire y la velocidad del movimiento (di Prampero y col. 1979).

En ocasiones se han utilizado rodillos como método alternativo para simular las condiciones de terreno durante los test de laboratorio (Firth 1981, La Voie y col. 1988, Seifert & Langenfeld 1988). Sin embargo, varios autores han evaluado al ciclista en condiciones específicas a su deporte (ruta o velódromo) para cuantificar la interacción entre la potencia desarrollada por el ciclista y la resistencia al avance con que éste se encuentra (Pugh 1974, di Prampero y col. 1979, Marion & Léger 1988, Conconi y col. 1988, McCole y col. 1990). Las evaluaciones mediante test específicos a su deporte tienen la ventaja de reproducir las condiciones que los ciclistas se encuentran durante las carreras. Basándose en los datos obtenidos bajo tales condiciones experimentales, se han propuesto distintas ecuaciones para estimar el costo energético del ciclismo a una velocidad determinada, así como la potencia desarrollada (di Prampero y col. 1979, Davies 1980, Gross y col. 1983, McCole y col. 1990).

4.1.2. Material y métodos

4.1.2.1. Sujetos

En este estudio participaron doce ciclistas masculinos de categoría amateur. Todos ellos participaban de forma habitual en competiciones de nivel nacional en el

momento en que se llevó a cabo el estudio. Su edad, masa corporal, altura y superficie corporal estimada (Du Bois & Du Bois 1916) eran 19 ± 3 años, $67,9 \pm 4,8$ kg, $177,7 \pm 6,9$ cm y $1,84 \pm 0,10$ m², respectivamente. Los sujetos fueron informados detalladamente sobre el propósito, los procedimientos y los riesgos potenciales del estudio antes de que dieran su consentimiento de participación por escrito. Cada sujeto llevó a cabo un test de campo en velódromo y un test de laboratorio, con un intervalo de cuatro días entre ambos.

4.1.2.2. Test de velódromo

Se llevó a cabo un test progresivo rectangular máximo en una pista cubierta de 285 metros situada a nivel del mar, con una presión barométrica de 760 mmHg, temperatura del aire de 20° C y humedad relativa del 60 %. Cada ciclista utilizó su propia bicicleta de competición en ruta (Razesa, Alsasua, Pinarello, Treviso, Italia), en posición de carrera (es decir, postura inclinada con las manos en la sección inferior del manillar). El peso de las bicicletas era de aproximadamente 10 kg, con pequeñas variaciones dependiendo de la talla del cuadro y estaba adaptada a la morfología de cada ciclista. El diámetro de las ruedas delantera y trasera era de 0,7 m. Ambas ruedas tenían 36 radios cilíndricos. Los tubulares (Clement, Milan, Italia o Vittoria, Bergamo, Italia) estaban inflados a una presión de 6,0 kg/cm². El rango de desmultiplicaciones era de 53 x 21 a 53 x 14. Todos los ciclistas llevaban sistemas de pedales automáticos, culote, maillot y casco de seguridad de diseño no aerodinámico. El test consistía en fases de 2.280 m (ocho vueltas) separadas por periodos de recuperación de 1 minuto. Se estableció una velocidad inicial de 28 km/h, y ésta fue incrementada 1,5 km/h después

de cada fase, hasta el agotamiento. Cada ciclista seleccionó su desmultiplicación preferida a cada velocidad. Las bicicletas estaban equipadas con un microordenador en el manillar para la monitorización de la velocidad (Polar Cyclovantage, Polar, Stamford, EE.UU.). Se registró la frecuencia cardiaca durante todo el test (Sport Tester PE 3000, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia). Se determinó el valor de frecuencia cardiaca de estado estable al último minuto de cada fase. Se obtuvieron muestras de sangre durante los primeros segundos de recuperación después de cada intensidad de ejercicio para la determinación de la concentración de lactato sanguíneo. Las muestras de sangre capilar (25 µl) se extrajeron del lóbulo de la oreja previamente hiperemizado. Se determinó la concentración de lactato sanguíneo mediante técnica electroenzimática con un Lactato Analyser 640 (Roche Bioelectronics, Hoffman-La Roche, Basel, Suiza) según la descripción de Geysant y col. (1985). Dos colaboradores con cronómetro registraron independientemente el tiempo de duración de cada fase para precisar la velocidad de desplazamiento real. Los parámetros de la última velocidad de desplazamiento mantenida durante al menos 2 minutos se consideraron máximos. Los ciclistas recibieron ánimos de manera verbal durante el test.

La potencia desarrollada por cada ciclista a una velocidad de desplazamiento determinada se estimó a partir de la siguiente ecuación propuesta por di Prampero (1979):

$$W = (0,045 P V) + [0,041 BSA (Pb/T) V^3]$$

Donde 0,045 es la resistencia a la rodadura; P es el peso del ciclista y la bicicleta en kg; V es la velocidad en m/s; 0,041 es la resistencia del aire; BSA es el área de superficie corporal del ciclista en m²; P_b es la presión atmosférica en mmHg; T es la temperatura del aire en K° y V es la velocidad en m/s.

Se estimó el consumo de oxígeno (VO₂) en el velódromo utilizando la ecuación (1) y asumiendo una eficiencia del 25% (di Prampero y col. 1979):

$$VO_2 = [R_1 P V + R_2 BSA (P_b/T) V^3] + MB$$

Donde R₁ = 8,6/10³ (ml O₂/kg/m); R₂ = 7,8/10³ (ml O₂/S²/K°/mm Hg/m⁵) y MB es el metabolismo basal (ml O₂/s), que se consideró igual a 3,6 ml O₂/kg/min (McArdle y col. 1986).

Además, se llevó a cabo una segunda estimación de VO₂ reemplazando los valores de R₁ y de R₂ en la ecuación (2) por aquellos propuestos por Davies (1980) de R₁ = 4,3/10³ y por Gross y col. (1983) de R₂ = 6,89/10³, respectivamente.

Finalmente, también se estimó el VO₂ en el velódromo utilizando la ecuación propuesta por McCole y col. (1990):

$$VO_2 = -4,5 + 0,17 V + 0,052 S + 0,022 P$$

Donde V es la velocidad del ciclista en km/h; S es la velocidad del viento en km/h, y P es el peso del ciclista en kg.

4.1.2.3. Test de laboratorio

Cada ciclista llevó también a cabo un test de laboratorio progresivo rectangular máximo en un cicloergómetro de freno mecánico (Monark 818, Varberg, Suecia) para determinar el consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_{2\text{max}}$) a nivel del mar. El test comenzó con una potencia inicial de 100 w. La intensidad de ejercicio aumentó 18 w cada 3 minutos hasta que el ciclista llegó al agotamiento, con 1 minuto de recuperación entre cada intensidad de ejercicio. La cadencia de pedaleo se mantuvo constante a 70 rpm a lo largo del test. Los ciclistas mantenían la cadencia al ritmo de un metrónomo. Se registró la frecuencia cardiaca a lo largo del test (Sport Tester PE 3000, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia), y se determinó la frecuencia cardiaca correspondiente a cada intensidad de ejercicio de la misma manera que en el velódromo (último minuto de trabajo). Se obtuvo una muestra de sangre durante los primeros segundos de recuperación después de cada intensidad de ejercicio para la determinación de la concentración de lactato sanguíneo. Durante el test, los ciclistas respiraban a través de una válvula de baja resistencia (Hans Rudolph 2700, Kansas City, MO, EEUU) conectada a un pneumotacógrafo y a un sistema de análisis de gases (Ergoxyscreen, E. Jaegger, Würzburg, Alemania) para la determinación de la ventilación, el VO_2 y las fracciones de gases. Antes de cada prueba se calibraron el pneumotacógrafo y los analizadores de gases con una jeringa de volumen conocido y con gases de composición conocida analizados mediante la técnica Schölander, respectivamente. Se monitorizó el VO_2 durante los últimos 30 segundos de cada intensidad. Se determinó el final del test máximo al alcanzar el agotamiento voluntario (incapacidad de mantener la cadencia de pedaleo requerida). Los parámetros registrados durante la última intensidad de ejercicio

mantenida durante al menos 2 minutos completos se consideraron máximos. Para considerar una intensidad de ejercicio como máxima se exigió un ratio de intercambio respiratorio de al menos 1,05. Como en el test de velódromo, se animó verbalmente a los ciclistas durante el test.

4.1.2.4. Intensidad de ejercicio al OBLA

Se determinó la intensidad de ejercicio al Inicio de Acumulación de Lactato sanguíneo (OBLA, Sjödín & Jacobs 1981) mediante interpolación lineal entre los dos puntos más cercanos a la concentración de 4 mmol/l en la curva de acumulación de lactato sanguíneo y nivel de intensidad de ejercicio (potencia desarrollada en el test de laboratorio y velocidad en el test de velódromo). Además, se estimaron mediante interpolación lineal diferentes porcentajes de la potencia aeróbica máxima en ambas condiciones de evaluación, laboratorio y velódromo.

4.1.2.5. Análisis estadísticos

Las comparaciones entre los resultados del velódromo estimados mediante las ecuaciones (1) y (2) y los resultados del laboratorio se llevaron a cabo con el test *t* de Student para pares de datos. Las correlaciones entre variables se calcularon mediante regresión lineal. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar los valores de VO₂ obtenidos con los distintos métodos de medición y de estimación. Se estableció el nivel de significancia estadística en $P < 0,05$.

4.1.3. Resultados

Como muestra la Tabla 3, no se observaron diferencias significativas entre el velódromo y el laboratorio en los valores máximos de potencia, frecuencia cardíaca y $\text{VO}_{2\text{max}}$. La máxima concentración de lactato sanguíneo, sin embargo, fue significativamente más alta en el velódromo que en el laboratorio: $13,5 \pm 2,1$ y $11,8 \pm 3,1$ mmol/l ($P < 0,05$). La potencia y la frecuencia cardíaca a la intensidad de ejercicio correspondiente al OBLA fueron de 291 ± 45 y 302 ± 39 W ($P < 0,05$) y de 176 ± 9 y 180 ± 9 latidos/min ($P < 0,05$) en los test de velódromo y de laboratorio, respectivamente (Tabla 3). También se observaron diferencias significativas entre los test de velódromo y de laboratorio en las frecuencias cardíacas a intensidades de ejercicio submáximas correspondientes al 40%, 50% y 60% de la potencia aeróbica máxima (Figura 13), y en las concentraciones de lactato sanguíneo al 60%, 70% y 80% de la potencia aeróbica máxima (Figura 14).

Tabla 3. Comparación entre los valores fisiológicos obtenidos en el velódromo y en el laboratorio a intensidad de ejercicio máxima y a la intensidad de ejercicio correspondiente al Inicio de Acumulación de Lactato sanguíneo (OBLA); FC frecuencia cardíaca; VO_{2max} consumo máximo de oxígeno; NS diferencia no significativa entre los valores de laboratorio y de velódromo. Los valores son medias \pm DS.

| | Intensidad Máxima | | | Intensidad OBLA | | |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------|
| | Potencia (w) | FC (latidos/min) | VO_{2max} (l/min) | Potencia (W) | FC (latidos/min) | |
| Velódromo | 372 \pm 50 | 195 \pm 8 | 4,49 \pm 0,56 | 13,5 \pm 2,1 | 291 \pm 45 | 176 \pm 9 |
| | NS | NS | NS | $P < 0,05$ | $P < 0,05$ | $P < 0,05$ |
| Laboratorio | 365 \pm 36 | 196 \pm 9 | 4,49 \pm 0,46 | 11,8 \pm 3,1 | 302 \pm 39 | 180 \pm 9 |

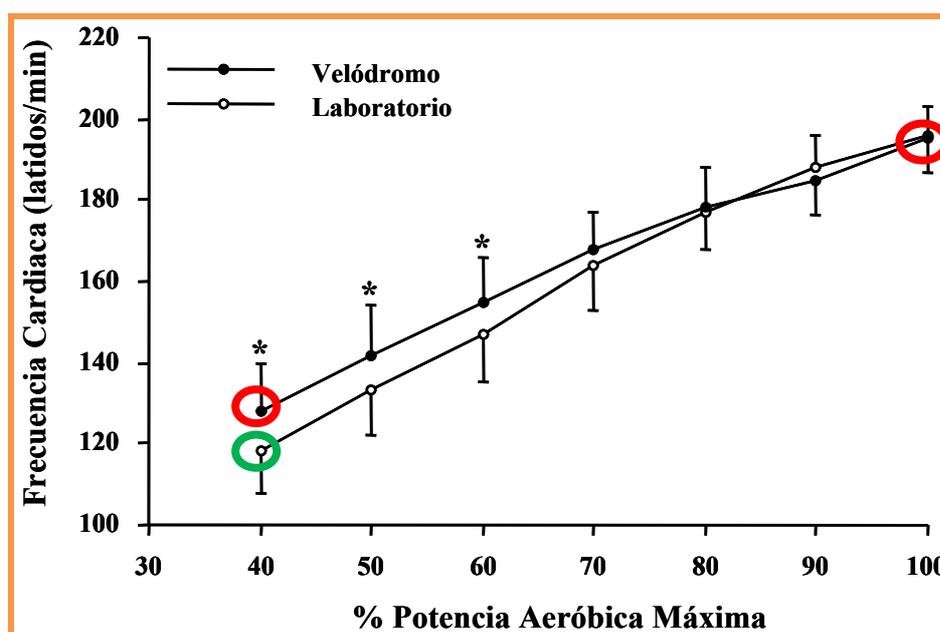


Figura 13. Comparación entre las frecuencias cardíacas de laboratorio y de velódromo a diferentes intensidades de ejercicio. * Diferencia significativa ($P < 0,05$) entre los valores de velódromo y de laboratorio.

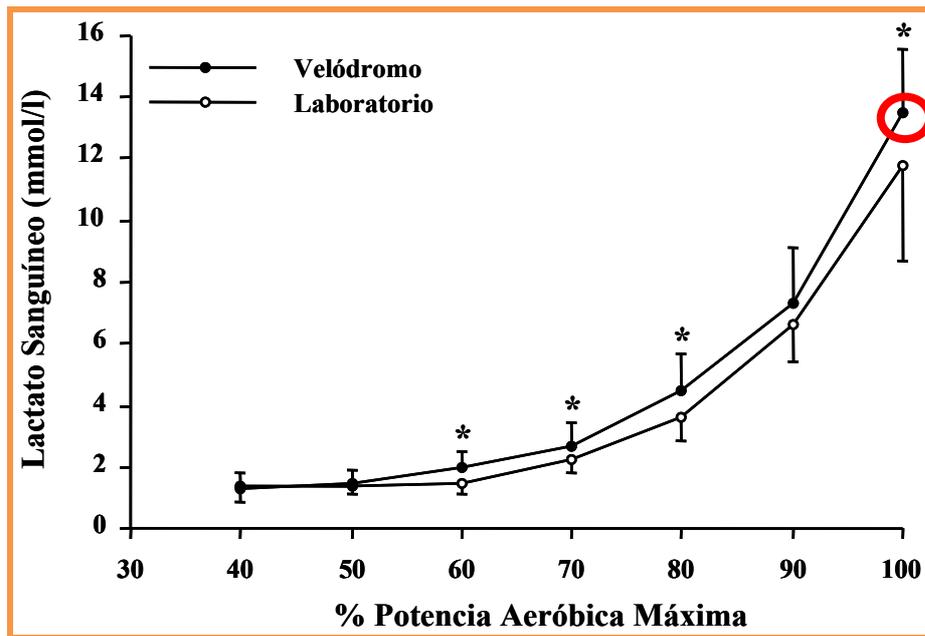


Figura 14 Comparación entre las concentraciones de lactato sanguíneo de laboratorio y de velódromo a diferentes intensidades de ejercicio. * Diferencia significativa ($P < 0,05$) entre los valores de velódromo y de laboratorio.

La velocidad máxima alcanzada en el velódromo correlacionó con el VO_{2max} del laboratorio expresado por unidad de masa corporal ($ml/min/kg$, $r = 0,93$, Figura 15), por unidad de área de superficie corporal ($l/min/m^2$, $r = 0,89$) o en valores absolutos (l/min , $r = 0,76$). Del mismo modo, las correlaciones entre la velocidad de desplazamiento a la intensidad OBLA en el velódromo y la potencia a la intensidad OBLA en el laboratorio fueron más altas cuando se expresaron por unidad de masa corporal (W/kg , $r = 0,91$) que cuando se expresaron por unidad de área de superficie corporal (W/m^2 , $r = 0,88$) o en valores absolutos (W , $r = 0,70$).

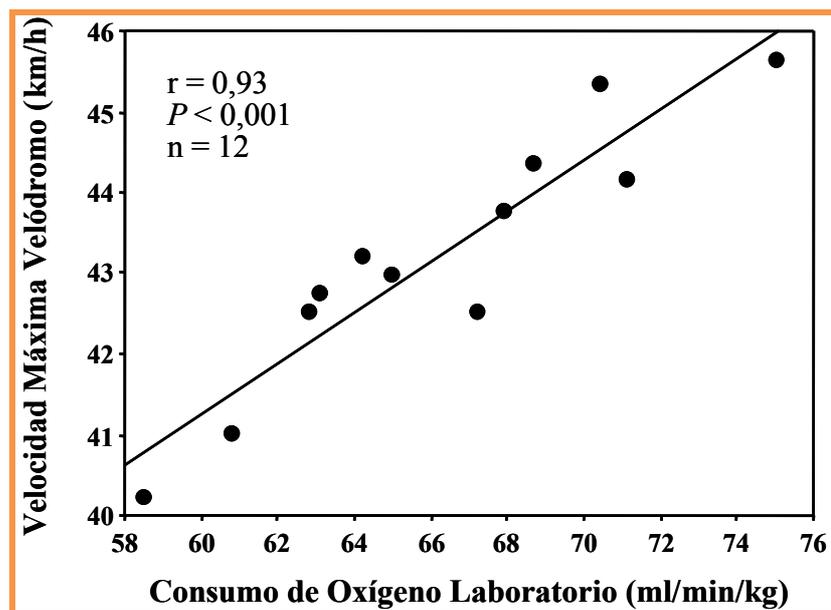


Figura 15. Relación entre el rendimiento máximo alcanzado en el velódromo (máxima velocidad de desplazamiento) y el consumo máximo de oxígeno medido en el laboratorio (expresado por unidad de masa corporal).

Si bien los valores de VO_{2max} medidos en el laboratorio y los estimados a partir de la ecuación (1) fueron iguales ($4,49 \pm 0,46$ y $4,49 \pm 0,56$ l/min), se dieron diferencias significativas entre estos dos valores y los obtenidos con las ecuaciones (3) y (4): $3,83 \pm 0,51$ y $4,32 \pm 0,35$ l/min, respectivamente, así como entre estos dos últimos valores (Figura 16).

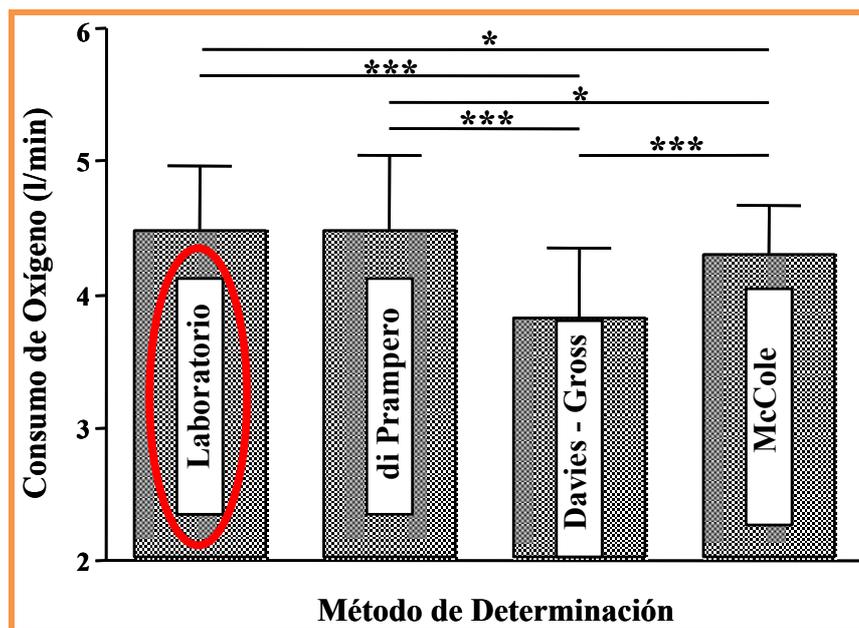


Figura 16. Valores de consumo máximo de oxígeno medidos en el laboratorio y estimados a partir de la máxima velocidad de desplazamiento alcanzada en el velódromo, utilizando las ecuaciones propuestas por di Prampero y col. (1979), Davies (1980) y Gross y col. (1983), y McCole y col. (1990). * y ** Diferencias significativas entre valores ($P < 0,05$ y $P < 0,001$, respectivamente).

4.1.4. Discusión

Este estudio muestra la validez de un protocolo de test en velódromo para estimar las características metabólicas de ciclistas de ruta de competición, siempre que dicha estimación se realice utilizando las ecuaciones propuestas por di Prampero y col. (1979). Cuando se realizaron los test a los ciclistas en condiciones de laboratorio, los valores fisiológicos expresados por unidad de área de superficie corporal pronosticaron el rendimiento en condiciones de campo de manera más precisa que los valores absolutos.

En este estudio, los valores máximos de varios parámetros fisiológicos obtenidos en las condiciones del test en velódromo y en el laboratorio fueron similares. Esta observación indica, en concordancia con estudios previos, que la respuesta adaptativa del ciclista no depende del tipo de resistencia impuesta. En efecto, La Voie & col. (1988) y Seifert & Langenfeld (1988) compararon los valores de consumo máximo de oxígeno obtenidos en un cicloergómetro con freno de fricción y en bicicletas específicas para este deporte, observando que no había diferencias significativas. Marion & Léger (1988) obtuvieron resultados similares comparando test en laboratorio y en una pista cubierta. Los ciclistas de competición, sin embargo, expresan a menudo su preferencia por test específicos para su deporte realizado con equipamientos que les resultan familiares. En este sentido, el protocolo de test de campo en el velódromo utilizado en este estudio parece ser un método valioso para el estudio de las características fisiológicas de los ciclistas de ruta. Por lo tanto, los datos obtenidos bajo las condiciones de evaluación descritas anteriormente podrían utilizarse no sólo para evaluar el potencial fisiológico y metabólico de los ciclistas, sino también para la prescripción de sus programas de entrenamiento (Van Handel y col. 1988).

Sin embargo, durante el test en el velódromo se observó un valor máximo de concentración sanguínea de lactato significativamente más alto, diferencia que podría explicarse por los diferentes protocolos utilizados en ambos test. De hecho, cada intensidad de ejercicio se mantuvo durante tres minutos en el test de laboratorio. En el velódromo, por el contrario, las fases de ejercicio a distintas intensidades consistieron en cubrir una distancia determinada a velocidades progresivamente crecientes, haciendo que la duración del ejercicio en cada nivel de intensidad variara entre cinco minutos y

tres minutos y medio. La mayor cantidad de trabajo acumulado en el velódromo, así como un mayor aumento en la producción de trabajo (explicado por su relación dependiente del cuadrado de la velocidad, en comparación con el incremento lineal en el laboratorio), podrían pues ser responsables de la mayor concentración de lactato sanguíneo.

La potencia mecánica y la frecuencia cardíaca a la intensidad de ejercicio OBLA fueron ligera pero significativamente más altas en el test de laboratorio que en el del velódromo. Este fenómeno, así como las diferencias en la frecuencia cardíaca y la concentración de lactato sanguíneo observadas a diversas intensidades de ejercicio submáximas, podría explicarse bien por una estimación imprecisa de la potencia en el velódromo o bien por una respuesta diferente de los ciclistas al test del velódromo. La buena correlación obtenida entre la potencia máxima medida en el laboratorio y la estimada a partir de la velocidad máxima alcanzada en el velódromo parece indicar la validez de la ecuación propuesta por di Prampero (1979) para estimar la potencia mecánica. Por lo tanto, las diferencias observadas deberían atribuirse principalmente a los diferentes protocolos utilizados en el velódromo y en el laboratorio. Las diferencias de tiempo de pedaleo a cada intensidad de ejercicio podrían haber llevado a sobreestimar la potencia a la intensidad de ejercicio OBLA durante el protocolo de laboratorio (Davies 1980, Yoshida 1984). La menor frecuencia cardíaca a la intensidad OBLA en el velódromo podría explicarse por una potencia aproximadamente un 4% menor, a pesar de una cantidad de trabajo total mayor y una mayor cadencia de pedaleo (85-90 rpm a intensidades submáximas), que podrían haber llevado a una mayor

frecuencia cardiaca que la registrada en el laboratorio (Hagberg y col. 1981, Yoshida 1984).

Se observó una relación estrecha entre el rendimiento en el velódromo y los datos de laboratorio cuando éstos se expresaron por unidad de área de superficie corporal o de masa corporal, lo cual indica la gran importancia de las variables antropométricas cuando el ciclista se ejercita en las condiciones de campo. Esta relación entre el rendimiento del ciclista y sus características antropométricas coincide con observaciones previas descritas en la literatura. En efecto, Adams & Seabury (1976) y Van Baak & Binkhorst (1981) concluyeron que el área de superficie corporal es la variable antropométrica más significativa relacionada con el gasto energético y el consumo de oxígeno durante el ciclismo. Además, Swain y col. (1987) han demostrado que la razón área de superficie corporal/masa corporal es un 11% menor en ciclistas grandes ($84,4 \pm 3,2$ kg) que en ciclistas pequeños ($59,4 \pm 4,1$ kg). Estos autores han demostrado también que la razón área frontal/masa corporal es un 16% menor en ciclistas grandes. Se ha sugerido que ésta es la principal causa de que los ciclistas grandes tengan un consumo de oxígeno/masa corporal un 22% menor (Swain y col. 1987). Otros autores también han publicado resultados que indican una relación estrecha entre el tamaño corporal y el costo energético del ciclismo (Marion & Léger 1988). Las observaciones aquí mencionadas han sido atribuidas a una reducción de la razón área de superficie corporal/masa corporal a medida que aumenta el tamaño corporal, y a una mayor eficiencia de los ciclistas grandes en comparación con los ciclistas pequeños a la hora de reducir la resistencia aerodinámica (Swain y col. 1987, Van Baak & Binkhorst 1981). Así pues, los datos fisiológicos obtenidos en condiciones

de test de laboratorio pueden reflejar el nivel de rendimiento potencial de un ciclista de manera más exacta si se expresan en relación al área de superficie corporal o masa corporal.

El test en velódromo respecto al test en el túnel del viento subestima el SCx ($0.0035 \pm 0.0038 \text{ m}^2$) el cual disminuye cuando aumenta la velocidad (0.0013 m^2 cada 1 km.h^{-1}) por lo que sus datos no pueden ser intercambiados. Asimismo se ha descrito que pequeños cambios en la posición aerodinámica afecta al SCx, el cual puede disminuir $0.011 \pm 0.007 \text{ m}^2$ ($4.6 \pm 2.9 \%$) lo que resulta una ventaja para la realización de los test en velódromo como valoración funcional del ciclista como concluye García-López y col. (2014).

Los resultados de este estudio confirman la validez de la ecuación propuesta por di Prampero (1979) para estimar el consumo máximo de oxígeno y la potencia a partir de la velocidad alcanzada por el ciclista en el velódromo utilizando material de ciclismo convencional coincidiendo con lo publicado por González-Haro y col. (2008) al comparar nueve fórmulas teóricas para estimar la potencia realizada por los ciclistas en test en velódromo.

Existe similitud remarcable entre los valores obtenidos en el test de laboratorio y los valores estimados a partir de la velocidad de desplazamiento en el velódromo. Por el contrario, cuando los coeficientes de resistencia a la rodadura y de arrastre propuestos por di Prampero y col. (1979) fueron sustituidos por aquellos propuestos por Davies (1980) y Gross y col. (1983), respectivamente, el consumo máximo de oxígeno de los

ciclistas se subestimó significativamente. Estos valores más bajos se observaron también en comparación con las estimaciones llevadas a cabo a partir de la ecuación propuesta por McCole y col. (1990). Cabe destacar, sin embargo, que las diferencias observadas entre el consumo máximo de oxígeno medido en el laboratorio y el estimado en el velódromo utilizando la ecuación de McCole desaparecieron cuando se añadió el peso de la bicicleta a la del ciclista. De este modo, el consumo máximo de oxígeno estimado de $4,32 \pm 0,35$ l/min aumentó a $4,50 \pm 0,35$ l/min, valor que no es significativamente diferente del medido en el laboratorio ni del estimado utilizando la ecuación de di Prampero.

La fórmula de McCole estima perfectamente el VO_{2max} especialmente cuando la velocidad máxima aeróbica en el velódromo es expresada en términos relativos como lo afirma en su estudio González-Haro y col. (2008)

Los valores más bajos obtenidos con los coeficientes de Davies (1980) y Gross y col. (1983) podrían atribuirse al hecho de que las ecuaciones propuestas por di Prampero y col. (1979) y McCole y col. (1990) solo son adecuadas cuando no se utiliza material diseñado para mejorar la aerodinámica. Se ha demostrado que este tipo de equipamiento (por ejemplo cuadro aerodinámico, ruedas lenticulares, manillar de triatlón) mejora el rendimiento sin aumentar el costo energético del ciclismo (McCole y col. 1990). Se ha publicado que utilizando una bicicleta de diseño aerodinámico el gasto energético se redujo en un 7 % a una velocidad de desplazamiento de 40 km/h (McCole y col. 1990). Además, un estudio comparativo sobre el costo energético del récord mundial de la hora concluyó que el coeficiente de resistencia se redujo entre un 11,7 %

y un 16,9 % cuando se utilizaron equipamientos aerodinámicos (Péronnet y col. 1989). En el mismo estudio, se observó que cuando se utilizó material de diseño aerodinámico el consumo máximo de oxígeno y la potencia se sobreestimaban utilizando la ecuación y los coeficientes de resistencia de di Prampero y col. 1979. Se ha descrito que la sobreestimación del consumo máximo de oxígeno llegó a 1,4 l/min a una velocidad de desplazamiento de 50 km/h (Péronnet y col. 1989).

5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL iii

5.1. ESTUDIO III

5.1. ESTUDIO III. RENDIMIENTO EN TERRENO LLANO Y EN SUBIDA EN CICLISMO DE RUTA PROFESIONAL

5.1.1. Introducción

Desde un punto de vista metabólico, el ciclismo de ruta es un deporte de resistencia con exigencias aeróbicas muy altas. De hecho, se han descrito a menudo valores altos de consumo máximo de oxígeno (Sjøgaard 1984, Coyle y col. 1988, Faria 1992, Hawley & Noakes 1992, Olds y col. 1995) y potencia al umbral de lactato en condiciones de laboratorio entre ciclistas de ruta de competición (Coyle y col. 1988, Ice y col. 1988, Neumann y col. 1992). Sin embargo, se ha sugerido que para conseguir una predicción más precisa del nivel de rendimiento del ciclista en el terreno los valores fisiológicos obtenidos en el laboratorio deberían expresarse en relación a variables antropométricas, debido a su influencia sobre el rendimiento en ciclismo de ruta (Olds y col. 1993, Swain 1994, Olds y col. 1995).

El ciclismo de ruta es un deporte que exige rendir en una gran variedad de terrenos (por ejemplo en carreteras llanas o en subida) y situaciones competitivas (por ejemplo de manera individual o a rueda de un grupo de ciclistas en pelotón). En cualquiera de las situaciones mencionadas, la cantidad de trabajo realizado por un ciclista viene determinada en gran medida por sus variables antropométricas (di Prampero y col. 1979, Swain y col. 1987, Swain 1994). Éstas incluyen la masa corporal

y el área frontal, que están entre las variables antropométricas determinantes del rendimiento más importantes, ya que la primera condiciona la resistencia dependiente de la gravedad, por lo que tiene una gran influencia en el rendimiento ciclista en subida, y la segunda afecta al rendimiento durante las contrarrelojes individuales, debido a su influencia sobre la resistencia aerodinámica (di Prampero y col. 1979, Swain y col. 1987). Por lo tanto, el rendimiento de un ciclista de ruta en cada tipo de terreno viene condicionado por sus características morfológicas. Esto ha contribuido a la aparición de especialistas dependientes del morfotipo en el ciclismo profesional, con funciones claramente definidas durante las distintas fases de una carrera, aunque no existe un morfotipo ideal de ciclista.

Es evidente sin embargo que para ganar una carrera por etapas de tres semanas como el Tour de Francia un ciclista debe ser competitivo durante todas las fases de la carrera (es decir, en terreno llano, en subida y en bajada, así como en etapas contrarreloj individuales). Esto requiere el mejor equilibrio posible entre las características fisiológicas y morfológicas del ciclista por una parte, y las exigencias competitivas de la carrera por otra.

Diversas investigaciones han estudiado las relaciones entre las variables metabólicas y antropométricas durante el ciclismo (di Prampero y col. 1979, Swain y col. 1987, Marion & Léger 1988, Coyle y col. 1991, Swain 1994). Sin embargo, hasta el momento ningún estudio ha analizado por separado estas relaciones en referencia a la principal función específica del ciclista en competición.

5.1.2. Material y métodos

5.1.2.1. Sujetos

Veinticuatro miembros de un equipo ciclista de ruta profesional participaron en este estudio. Todos los ciclistas competían a nivel internacional y habían participado al menos una vez en el Tour de Francia. Tres de los corredores eran ganadores de etapa en grandes vueltas de tres semanas (Tour de Francia, Giro de Italia, Vuelta a España), sumando un total de nueve victorias, mientras que otros tres ciclistas habían conseguido segundos puestos en estas carreras. Las características de los ciclistas aparecen en la Tabla 2.4.1. Se llevaron a cabo los test en el mes de abril, es decir, durante la temporada de competición. En el momento de hacer los test, los corredores llevaban recorridos aproximadamente 10.000 km en entrenamiento y competición desde el inicio de la temporada, y en ese momento estaban realizando 700-1.000 km a la semana. Según la recomendación del director del equipo, y en función de su papel en competición, los ciclistas fueron incluidos en uno de cinco grupos posibles: escaladores (UH, $N = 9$), es decir, ciclistas que llevan a cabo su trabajo de equipo principalmente en las subidas a puertos de montaña; rodadores (FT, $N = 5$), es decir, ciclistas que contribuyen al control de la carrera sobre todo en carreteras llanas; todoterrenos (AT, $N = 6$), quienes pueden rendir bastante bien en todo tipo de terrenos; especialistas en contrarreloj (TT, $N = 4$), capaces de lograr rendimientos individuales excepcionales en las etapas de contrarreloj; esprinteres, es decir, aquellos corredores que compiten principalmente por la victoria en etapas llanas. Ninguno de los corredores de este estudio era esprinter, porque el

principal objetivo del equipo no era lograr victorias de etapa sino la victoria en la clasificación general en carreras de tres semanas. Los ciclistas dieron su consentimiento informado de participación después de recibir explicaciones orales y escritas sobre los objetivos, procedimientos y riesgos potenciales del estudio.

5.1.2.2. Variables antropométricas

Se determinó el área de superficie corporal (BSA, en m²) de cada ciclista a partir de su masa y su talla, tal como describieron Du Bois & Du Bois (1916):

$$BSA = 0,007184 \cdot BM^{0,425} \cdot H^{0,725}$$

Donde BM es el masa corporal (en kg) y H es la altura del ciclista (en cm).

Asumiendo que el área frontal (FA) puede ser considerada como proporcional a la BSA (di Prampero y col. 1979), y según valores determinados previamente (Swain y col. 1987, Olds y col. 1995), se consideró que el valor de FA era un 18,5% de la BSA.

La relativización de los valores máximos y submáximos de potencia aeróbica y consumo de oxígeno se llevó a cabo utilizando los exponentes de masa 0,32 para evaluar la capacidad ciclista en terreno llano y 0,79 para evaluar la capacidad ciclista en subida (Swain 1994).

Tabla 4. Características de los ciclistas. $N = 24$ ciclistas; W_{\max} potencia máxima; $VO_{2\max}$ consumo máximo de oxígeno; FC_{\max} frecuencia cardiaca máxima; La_{\max} concentración de lactato sanguíneo máxima.

| | Media \pm DS | Rango |
|--------------------------|------------------|-------------|
| Edad (años) | 26 \pm 3 | 21 - 34 |
| Altura (cm) | 180 \pm 6 | 160 - 190 |
| Peso (kg) | 68,2 \pm 6,6 | 53,0 – 80,0 |
| W_{\max} (W) | 431,8 \pm 42,6 | 349 - 525 |
| W_{\max} (W/kg) | 6,34 \pm 0,30 | 5,58 – 6,82 |
| $VO_{2\max}$ (l/min) | 5,36 \pm 0,47 | 4,42 – 6,42 |
| $VO_{2\max}$ (ml/kg/min) | 78,8 \pm 3,7 | 69,7 – 84,8 |
| FC_{\max} (lat/min) | 192 \pm 6 | 178 - 204 |
| La_{\max} (mmol/l) | 9,8 \pm 1,9 | 6,9 – 13,7 |

5.1.2.3. Protocolo

Todos los ciclistas realizaron un test de laboratorio rectangular progresivo máximo sobre un cicloergómetro con freno mecánico (Monark 818 E, Varberg, Suecia) adaptado con sillín de competición, manillar de carreras y pedales automáticos. La resistencia inicial se fijó en 110 w y se fue incrementando 35 w cada 4 minutos, con intervalos de recuperación de un minuto entre las cargas de trabajo. La cadencia de pedaleo se mantuvo constante a 75 rpm a lo largo del test. Los ciclistas mantenían la cadencia con la ayuda de un metrónomo. Cada test continuó hasta que el ciclista ya no era capaz de mantener la cadencia exigida. El cicloergómetro estaba situado sobre un

suelo perfectamente plano, y se llevó a cabo una calibración con pesos de 2 kg y 5 kg antes de cada test. Se obtuvieron muestras de sangre inmediatamente después de terminar cada carga de trabajo para la determinación de la concentración de lactato en la sangre ([La]). Los valores de [La] alcanzados durante la última carga de trabajo mantenida durante al menos 2 minutos completos se consideraron máximos. Se registró la frecuencia cardiaca a lo largo de cada test (Sport Tester PE3000, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia).

5.1.2.4. Potencia máxima

La potencia máxima se estableció como la máxima carga de trabajo que el ciclista pudo mantener durante un periodo completo de 4 minutos. Cuando la última carga de trabajo no se mantuvo durante 4 minutos completos, la potencia máxima (W_{\max}) se calculó como sigue (Kuipers y col. 1985):

$$W_{\max} = W_f + (t/240) \cdot 35$$

Donde W_f es el valor de la última carga de trabajo completada (W), t es el tiempo durante el cual se mantuvo la última carga de trabajo (s), y 35 es la diferencia de potencia entre las dos últimas cargas (W).

5.1.2.5. Consumo máximo de oxígeno

Para evitar cualquier posible interferencia del equipamiento de análisis de gases con el rendimiento de los ciclistas, el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max} , en l/min) se estimó a partir de W_{max} utilizando la ecuación de regresión propuesta por Hawley y Noakes (1992):

$$VO_{2max} = 0,01141 \cdot W_{max} + 0,435$$

5.1.2.6. Lactato sanguíneo

Se obtuvieron muestras de sangre capilar (25 μ l) del lóbulo de la oreja previamente hiperemizado durante los primeros segundos de recuperación al finalizar cada carga de trabajo. La ([La]) se determinó inmediatamente mediante una técnica electroenzimática con un analizador automático (YSI® 1500 Sport, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, OH, EEUU). Antes de cada test progresivo, se calibró el analizador con soluciones estándar con concentraciones de lactato conocidas (0, 5 y 15 mmol/l), según la recomendación del fabricante.

5.1.2.7. Determinación del LT y el OBLA

Se determinó el umbral de lactato (LT) en la curva de [La]-potencia de cada ciclista como la intensidad de ejercicio que provocó un aumento de [La] de 1 mmol/l por encima de los valores de lactato de base medidos durante el ejercicio al 40-60% del VO_{2max} (Hagberg & Coyle 1983). El Inicio de Acumulación de Lactato (OBLA) se identificó en la curva ([La])-potencia como la intensidad de ejercicio que provocó una [La] de 4 mmol/l (Sjödín & Jacobs 1981).

5.1.2.8. Análisis estadísticos

Las estadísticas descriptivas se expresan como medias \pm DS. Para estudiar las diferencias entre grupos se utilizó un ANOVA seguido del test *post hoc* de Fisher. Se estableció el nivel de significación estadística en $P < 0,05$. Además, las diferencias entre grupos para las variables de potencia y consumo de oxígeno se expresaron también como porcentaje de cambio en relación al valor más alto de entre los dos grupos comparados.

5.1.3. Resultados

5.1.3.1. Variables antropométricas

En la Tabla 5 se presentan las variables antropométricas principales de cada grupo de ciclistas. Los escaladores eran significativamente más ligeros, tenían menor área de superficie corporal y menor área frontal, pero una mayor área de superficie corporal/masa corporal que los otros grupos. Además, los escaladores también tenían

valores mayores de área frontal/masa corporal que los rodadores y los contrarrelojistas, además de ser más bajos que los rodadores. Los todoterreno eran también significativamente más ligeros, tenían menores área de superficie corporal y área frontal, y mayores área de superficie corporal/masa corporal y área frontal/masa corporal que los rodadores.

Tabla 5. Características antropométricas de los grupos; FT rodadores; TT contrarrelojistas; AT todoterrenos; UH escaladores; BSA área de superficie corporal; FA área frontal; BM masa corporal; * diferencia significativa con respecto a FT; † diferencia significativa con respecto a TT; ‡ diferencia significativa con respecto a AT. Los valores son medias \pm DS.

| | FT (N = 5) | TT (N = 4) | AT (N = 6) | UH (N = 9) |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| Edad (años) | 27 \pm 3 | 28 \pm 5 | 25 \pm 2 | 25 \pm 4 |
| Altura (cm) | 186 \pm 4 | 181 \pm 6 | 180 \pm 2 | 175 \pm 7* |
| Peso (kg) | 76,2 \pm 3,2 | 71,2 \pm 6,0 | 68,0 \pm 2,8* | 62,4 \pm 4,4*†‡ |
| BSA (m ²) | 2,00 \pm 0,06 | 1,91 \pm 0,11 | 1,87 \pm 0,04* | 1,76 \pm 0,10*†‡ |
| FA (m ²) | 0,370 \pm 0,011 | 0,353 \pm 0,020 | 0,345 \pm 0,008* | 0,326 \pm 0,019*†‡ |
| BSA/BM/10 ³ | 26,26 \pm 0,48 | 26,82 \pm 0,73 | 27,44 \pm 0,53* | 28,27 \pm 0,49*†‡ |
| FA/BM/10 ³ | 4,86 \pm 0,09 | 4,96 \pm 0,13 | 5,07 \pm 0,10* | 5,23 \pm 0,09*† |

5.1.3.2. Potencia máxima

Los valores más altos de potencia máxima se midieron en los rodadores (461 \pm 39 W), siendo este valor superior al de los todoterreno (432 \pm 27 W) y los escaladores (404 \pm 34 W, $P < 0.05$). Los contrarrelojistas (457 \pm 46 W) también mostraron un valor de potencia máxima significativamente superior a los escaladores (Figura 17 A).

Cuando la potencia máxima se expresó en relación al masa corporal, los valores más altos fueron los de los escaladores ($6,47 \pm 0,33$ W/kg), seguidos de los contrarrelojistas, los todoterreno y los rodadores ($6,41 \pm 0,12$, $6,35 \pm 0,18$ y $6,04 \pm 0,29$ W/kg, respectivamente). Estos valores fueron significativamente diferentes entre los escaladores y los rodadores (Figura 17 B).

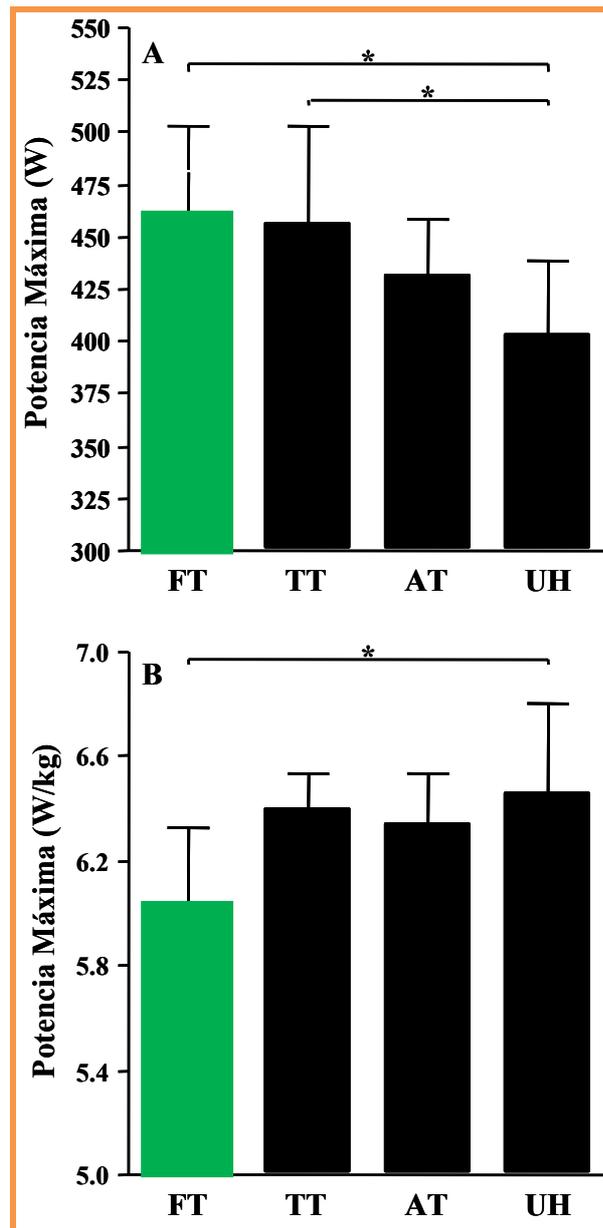


Figura 17. Medias \pm DS. Valores de potencia máxima de rodadores (FT, $N = 5$), contrarrelojistas (TT, $N = 4$), todoterrenos (AT, $N = 6$) y escaladores (UH, $N = 9$). **A:** valores absolutos; **B:** valores relativos al masa corporal. * Diferencia significativa entre grupos ($P < 0,05$).

Aunque se observaron diferencias importantes entre grupos en los valores medios de potencia máxima relativa a los exponentes de masa corporal 0,32 y 0,79, así como relativa al área frontal de los ciclistas, estas diferencias no alcanzaron el nivel de significatividad estadística ($116,6 \pm 8,6$; $115,0 \pm 8,5$; $111,9 \pm 5,6$; $107,6 \pm 7,3$ W/kg^{0,32}; $15,69 \pm 0,54$; $14,99 \pm 0,80$; $15,40 \pm 0,57$; $15,43 \pm 0,80$ W/kg^{0,79}; 1.293 ± 57 ; 1.300 ± 62 ; 1.253 ± 51 ; 1.239 ± 66 W/m² en contrarrelojistas, rodadores, todoterrenos y escaladores respectivamente).

Las diferencias porcentuales de potencia entre grupos, en valores absolutos y relativos se muestran en la Figura 18. Algunas de estas diferencias llegaron a ser de hasta 7,7 %, aunque no fueron estadísticamente significativas.

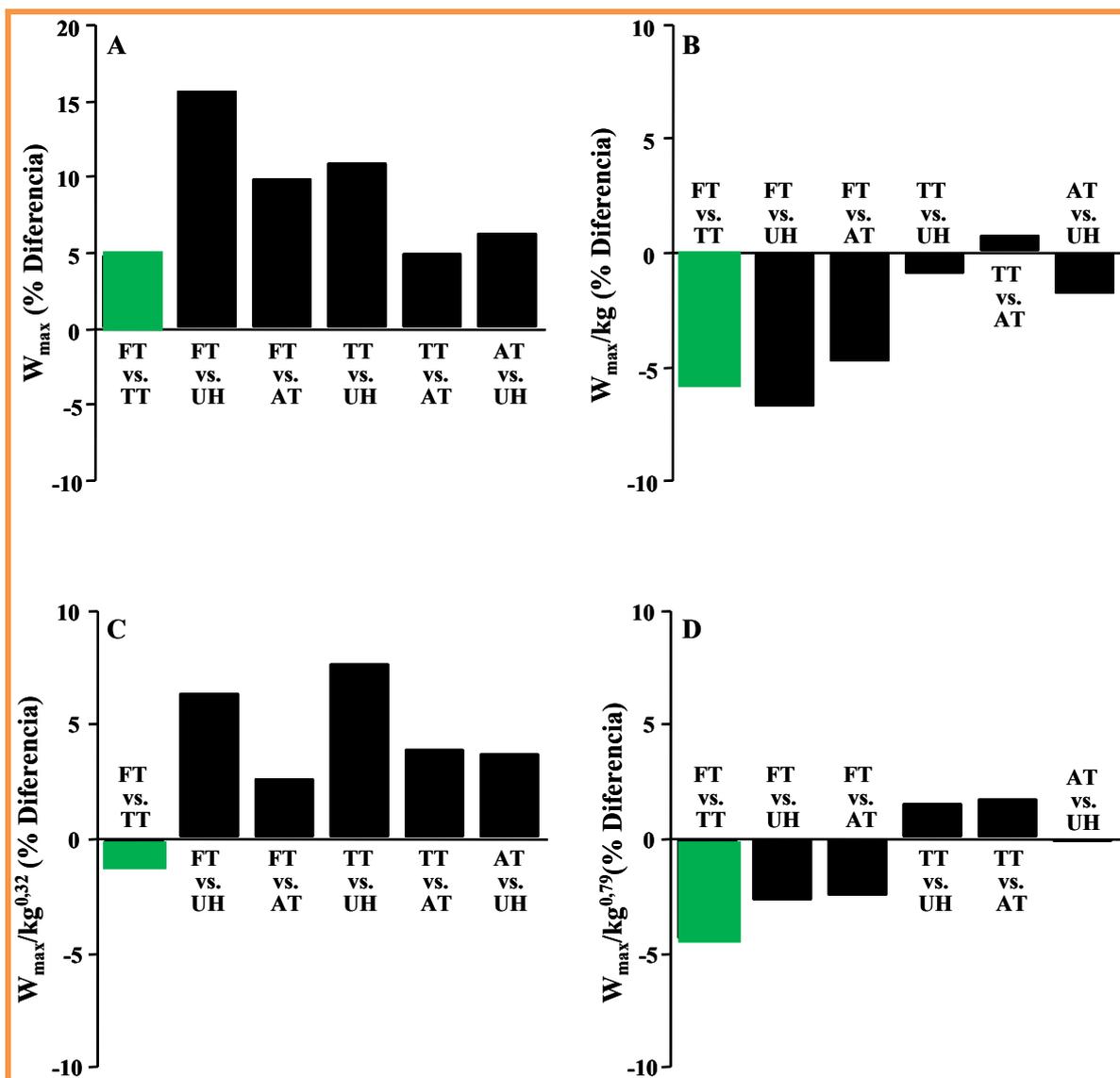


Figura 18. Diferencias porcentuales en los valores medios de potencia máxima (W_{max}) entre rodadores (FT, $N = 5$), contrarrelojistas (TT, $N = 4$), todoterrenos (AT, $N = 6$) y escaladores (UH, $N = 9$). **A:** valores absolutos; **B:** valores relativos al masa corporal; **C:** valores relativos al exponente de masa corporal 0,32; **D:** valores relativos al exponente de masa corporal 0,79.

5.1.3.3. Consumo máximo de oxígeno

Tal y como muestra la Figura 19 A, los valores absolutos estimados de consumo máximo de oxígeno fueron significativamente más altos en rodadores ($5,67 \pm 0,44$

l/min) y contrarrelojistas ($5,65 \pm 0,53$ l/min) que en escaladores ($5,05 \pm 0,39$ l/min), pero ninguno de estos valores fue significativamente diferente al de los todoterrenos ($5,36 \pm 0,30$ l/min). Sin embargo, el consumo de oxígeno relativo al masa corporal (Figura 19 B) fue significativamente inferior en rodadores ($74,4 \pm 3,0$ ml/kg/min) que en contrarrelojistas, todoterrenos y escaladores ($79,2 \pm 1,1$; $78,9 \pm 1,9$; $80,9 \pm 3,9$ ml/kg/min, respectivamente). Las diferencias porcentuales en los valores absolutos y relativos estimados de consumo de oxígeno entre grupos variaron entre el 0,3 y el 11 %.

5.1.3.4. Lactato sanguíneo

Los valores de máxima concentración de lactato sanguíneo obtenidos durante el test progresivo fueron de $9,3 \pm 1,2$; $9,3 \pm 2,7$; $11,1 \pm 1,8$; $9,5 \pm 1,9$ mmol/l en rodadores, contrarrelojistas, todoterrenos y escaladores, respectivamente, sin ser significativamente diferentes entre los grupos.

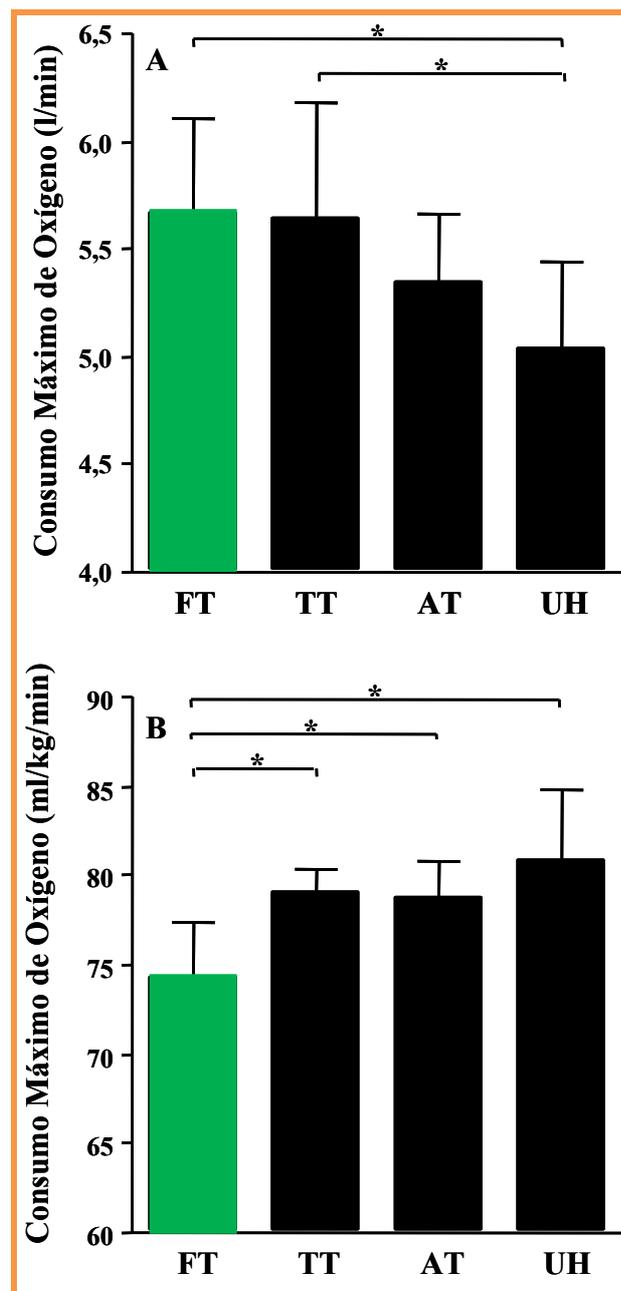


Figura 19. Medias \pm DS. Valores de consumo máximo de oxígeno de rodadores (FT, $N = 5$), contrarrelojistas (TT, $N = 4$), todoterrenos (AT, $N = 6$) y escaladores (UH, $N = 9$). **A:** valores absolutos; **B:** valores relativos al masa corporal. * Diferencia significativa entre grupos ($P < 0,05$).

5.1.3.5. Potencia al LT y al OBLA.

Los valores absolutos y relativos de potencia a las intensidades de ejercicio al LT y al OBLA se muestran en las Tablas 6 y 7 respectivamente. Al LT, la potencia absoluta más alta correspondió a los contrarrelojistas, seguidos de los rodadores, los todoterrenos y los escaladores. Los rodadores tenían los mayores valores al OBLA, seguidos por los contrarrelojistas, los todoterrenos y los escaladores, siendo los valores de los rodadores y los contrarrelojistas significativamente superiores a los de los escaladores.

Expresados en relación al masa corporal, a los exponentes de peso 0,32 y 0,79, y el área frontal, los contrarrelojistas tenían los mayores valores de potencia tanto al LT como al OBLA. Aunque no alcanzaron significatividad estadística, hubo diferencias de hasta un 14 % entre los distintos grupos en los valores medios de estas variables.

Tabla 6. Valores de potencia absoluta y relativa al umbral de lactato individual (LT); FT rodadores; TT contrarrelojistas; AT todoterrenos; UH escaladores; W_{LT} potencia al umbral de lactato individual; FA área frontal. Las diferencias entre grupos no son estadísticamente significativas. Los valores son medias \pm DS.

| | FT (N = 5) | TT (N = 4) | AT (N = 6) | UH (N = 9) |
|------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| W_{OBLA} (W) | 356 \pm 31 | 357 \pm 41 | 322 \pm 43 | 308 \pm 46 |
| W_{OBLA} (W/kg) | 4,67 \pm 0,25 | 5,00 \pm 0,20 | 4,73 \pm 0,48 | 4,91 \pm 0,50 |
| W_{OBLA} (W/kg ^{0,32}) | 89,0 \pm 6,7 | 91,0 \pm 8,0 | 83,4 \pm 10,0 | 81,9 \pm 10,8 |
| W_{OBLA} (W/kg ^{0,79}) | 11,60 \pm 0,69 | 12,25 \pm 0,64 | 11,47 \pm 1,23 | 11,71 \pm 1,29 |
| W_{OBLA} (W/m ² FA) | 962,5 \pm 59,0 | 1.009,7 \pm 65,0 | 933,7 \pm 110,2 | 940,7 \pm 10,3 |
| W_{OBLA} (% W_{max}) | 77 \pm 2 | 78 \pm 3 | 74 \pm 7 | 76 \pm 3 |

Tabla 7. Valores de potencia absoluta y relativa al inicio de la acumulación de lactato sanguíneo (OBLA); FT rodadores; TT contrarrelojistas; AT todoterrenos; UH escaladores; W_{OBLA} potencia al inicio de la acumulación de lactato sanguíneo; FA área frontal. * Diferencia significativa con respecto a FT; † diferencia significativa con respecto a TT. Los valores son medias \pm DS.

| | FT (N = 5) | TT (N = 4) | AT (N = 6) | UH (N = 9) |
|---|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| W_{LT} (W) | 417 \pm 45 | 409 \pm 46 | 366 \pm 38 | 356 \pm 41*† |
| W_{LT} (W/kg) | 5,46 \pm 0,42 | 5,73 \pm 0,21 | 5,37 \pm 0,37 | 5,70 \pm 0,46 |
| W_{LT} (W/kg ^{0,32}) | 104,1 \pm 10,3 | 104,3 \pm 8,9 | 94,8 \pm 8,7 | 94,8 \pm 9,6 |
| W_{LT} (W/kg ^{0,79}) | 13,57 \pm 1,10 | 14,03 \pm 0,69 | 13,04 \pm 0,99 | 13,57 \pm 1,14 |
| W_{LT} (W/m ² FA) | 1.125,8 \pm 100,3 | 1.156,8 \pm 70,0 | 1.061,0 \pm 91,0 | 1.090,4 \pm 88,0 |
| W_{LT} (% W_{max}) | 90 \pm 3 | 89 \pm 2 | 84 \pm 5 | 88 \pm 5 |

5.1.4. Discusión

Este estudio representa el primer intento por evaluar las características fisiológicas y de rendimiento de ciclistas de ruta profesionales en relación con su especialidad durante las carreras por etapas dependiente de su morfotipo. Los resultados obtenidos indican que la relativización de las características fisiológicas para tomar en consideración la influencia del morfotipo sobre las condiciones de la carretera es una aproximación válida para evaluar el rendimiento de los ciclistas profesionales.

Tomados en su conjunto, los ciclistas profesionales que participaron en esta investigación mostraron una capacidad aeróbica muy alta, tal como indican sus valores medios de potencia máxima tanto en valores absolutos (432 W) como en relación a su masa corporal (6,34 W/kg). Estos valores son superiores a los publicados previamente

para ciclistas de ruta de competición (Sjøgaard 1984, Coyle y col. 1991), probablemente debido al mayor nivel competitivo de los ciclistas participantes en este estudio (Tabla 8). En efecto, el término “élite” se ha utilizado a menudo en la literatura en referencia a ciclistas de ruta de nivel competitivo muy variable. Como se ha mencionado anteriormente, todos los ciclistas que participaron en esta investigación eran profesionales y habían participado en las carreras para la verdadera “élite” del ciclismo de ruta (Tour de Francia, Giro de Italia y Vuelta a España), obteniendo resultados destacados.

En la literatura también se han publicado valores de potencia de 470 W (Wilber y col. 1997), 457 W (Terrados y col. 1988) e incluso 575 W (Neumann y col. 1992) (Tabla 8). Estos valores medios extremadamente altos pueden ser debidos muy probablemente a la menor duración de los periodos de trabajo utilizados por los autores mencionados anteriormente (es decir, 2-3 minutos, e incluso 1 minuto a potencias cercanas a la potencia máxima) en comparación con los periodos de trabajo de 4 minutos utilizados en este estudio, lo cual puede tener como resultado potencias más altas, tanto a intensidades de ejercicio máximas como submáximas (Whipp y col. 1974, Davis & White 1982, Yoshida 1984).

Tabla 8. Características físicas, potencia máxima y consumo máximo de oxígeno en ciclistas. W_{\max} potencia máxima; $VO_{2\max}$ consumo máximo de oxígeno; * valores estimados utilizando la ecuación de regresión de Hawley & Noakes (1992); † valores medios de los dos grupos de ciclistas citados en la referencia. Los valores son medias.

| Referencia | Nivel | Talla (cm) | Masa (kg) | Freno ergómetro | W_{\max} (W) | W_{\max} (W/kg) | $VO_{2\max}$ (l/min) | $VO_{2\max}$ (ml/kg/min) |
|-------------------------|-------------|------------|-----------|------------------|----------------|-------------------|----------------------|--------------------------|
| Coyle y col. 1991 | Élite | | 72,8 | Mecánico | 406* | 5,58* | 5,07* | 69,1* |
| Hopkins & McKenzie 1994 | Amateur | 185 | 75,0 | Electromagnético | 405* | 5,39* | 5,05* | 68,0* |
| Lacour y col. 1987 | Profesional | 179 | 72,0 | Mecánico | 411 | 5,71 | 5,12 | 70,1 |
| Lindsay y col. 1996 | Amateur | 182 | 79,1 | Electromagnético | 416 | 5,26 | 5,20 | 65,7 |
| Padilla y col. 1996 | Amateur | 178 | 67,9 | Mecánico | 365 | 5,37 | 4,49 | 66,1 |
| Palmer y col. 1994 | Amateur | | 74,5 | Electromagnético | 398 | 5,39 | 4,97 | 66,7 |
| Palmer y col. 1996a | Amateur | 181 | 77,6 | Aire | 443 | 5,71 | 5,48 | 73,6 |
| Este estudio | Profesional | 180 | 68,2 | Mecánico | 432 | 6,34 | 5,36 | 78,8 |
| Sjøgaard 1984 | Profesional | 178 | 71,0 | Mecánico | 397* | 5,58* | 4,96* | 71,0* |
| Strømme y col. 1977 | Élite | | 80,1 | | 447* | 5,57* | 5,53* | 69,1* |
| Tanaka y col. 1993 | Amateur | 179 | 71,8 | Mecánico | 398* | 5,55* | 4,98* | 69,4* |
| Terrados y col. 1988 | Profesional | 179 | 71,0 | Mecánico | 428† | 6,03† | 5,04† | 70,0 |
| Wilber y col. 1997 | Élite | 182 | 72,6 | Electromagnético | 470 | 6,50 | 5,09 | 79,3 |

Además, el tipo de cicloergómetro utilizado durante el test también debería tenerse en cuenta, ya que los valores de potencia obtenidos con cicloergómetros de freno mecánico (por ejemplo, los ergómetros Monark) son un 9 % inferiores a los

valores obtenidos en ergómetros de freno electromagnético, debido a la ausencia de fricción en el sistema de transmisión de estos últimos (Åstrand 1970). En estas condiciones, la potencia máxima estimada para este grupo de ciclistas habría sido muy similar a algunos de los valores mencionados anteriormente (es decir, 471 W), a pesar de los periodos de trabajo son más largos.

Se ha sugerido que tener valores de potencia/masa corporal por encima de 5,5 W/kg es un requisito previo necesario para los ciclistas competitivos de máximo nivel (Palmer y col. 1994). Sin embargo, este valor sugerido no hace referencia a ciclistas profesionales. De hecho, tal valor parece ser bajo para el ciclismo profesional, de acuerdo con los valores de este estudio (valor medio de 6,34 W/kg, con un valor mínimo de 5,58 W/kg) y de estudios anteriores (Tabla 8). Ice y col. (1988) describieron un valor de potencia/masa corporal de 6,79 W/kg en el ganador de varias ediciones de la Race Across America.

Dado que en este estudio no se midió directamente el consumo de oxígeno, los resultados referentes a esta variable no serán discutidos en profundidad. Sin embargo, merece la pena indicar que los valores estimados en este grupo de ciclistas (es decir, 5,36 l/min y 78,8 ml/kg/min) fueron comparables a los de otras poblaciones ciclistas estudiadas con anterioridad (Tabla 8) y a los de deportistas que participan en eventos con altas exigencias aeróbicas, tales como la carrera de larga distancia (5.000 m, 10.000 m y maratón). Los valores estimados en efecto son muy similares a los publicados por Noakes (1991), Svedenhag & Sjödín (1994), Saltin y col. (1995) en corredores de resistencia de nivel internacional.

Es evidente que las características antropométricas juegan un papel muy importante en la resistencia que debe vencer un ciclista para generar movimiento. Tomando esto en consideración, varios autores han desarrollado ecuaciones matemáticas para estimar el rendimiento ciclista basándose en variables fisiológicas y físicas (di Prampero y col. 1979, Olds y col. 1993, Olds y col. 1995). Además, se ha sugerido que las medidas fisiológicas obtenidas en condiciones de laboratorio deberían expresarse en relación al masa corporal, al área de superficie corporal o al área frontal, para evitar la interacción entre las características fisiológicas y las dimensiones corporales, y obtener por tanto una predicción más precisa del rendimiento del ciclista en la carretera (Nevill y col. 1992, Swain 1994, Svedenhag 1995). En ciclismo en subida la velocidad de ascenso está directamente relacionada con la relación potencia-masa (W/kg) del ciclista pero en las contrarrelojes llanas está ligado a la relación potencia/área de resistencia aerodinámica (W/CdA) Por lo tanto, la relativización de las variables fisiológicas debería permitir comparar a sujetos con diferentes dimensiones corporales (que determinan las funciones específicas en los equipos ciclistas profesionales) y evaluar su potencial fisiológico y de rendimiento independientemente del tamaño corporal.

Como muestran los resultados de este estudio, la relativización de variables fisiológicas como la potencia máxima y submáxima o el consumo máximo de oxígeno minimizó las diferencias entre los grupos, que eran considerables cuando estas variables se expresaron en términos absolutos. Esta observación sugiere que las diferencias en valores absolutos de potencia y consumo de oxígeno entre grupos pueden atribuirse a

las características morfológicas de los ciclistas, aunque los grupos de especialistas se estructuraron atendiendo al criterio empírico del director deportivo del equipo. Los escaladores tenían los menores valores de masa corporal de entre todos los grupos. Se ha considerado que un valor bajo de masa corporal da ventaja con respecto a otros ciclistas más pesados en carreras en subida que implican una menor velocidad y minimizan por tanto la influencia de la resistencia aerodinámica sobre la cantidad de trabajo total (di Prampero y col. 1979, Swain 1994). Los ciclistas más grandes y pesados incluidos en los grupos de rodadores y todoterrenos, por otra parte, tienen algunas otras ventajas con respecto a los escaladores, tales como menores ratios área de superficie corporal/masa corporal y área frontal/masa corporal. En efecto, estas variables se han relacionado con una menor resistencia aerodinámica en relación a la masa corporal, con el resultado de un menor costo energético por unidad de masa corporal (Swain y col. 1987). Además, se ha demostrado que la altura y el tamaño corporal guardan una relación positiva con el rendimiento en una contrarreloj de 26 km (Olds y col. 1995).

Varios autores (Hawley & Noakes 1992, Palmer y col. 1994, Lindsay y col. 1996) han hallado relaciones significativas entre la potencia mecánica pico alcanzada en el laboratorio y el rendimiento en contrarreloj individual de entre 20 y 40 km en la carretera, obteniendo coeficientes de correlación de entre 0,84 y 0,99. Además, los valores de potencia al OBLA y al LT se han relacionado también con el rendimiento en contrarreloj de 40 km (Coyle y col. 1991, Hopkins & McKenzie 1994) y de 26 km (Craig y col. 1993). De acuerdo con estos resultados, los ciclistas rodadores deberían haber sido los mejores contrarrelojistas, ya que tenían valores absolutos más altos de

potencia máxima y potencia al OBLA que los contrarrelojistas, los todoterreno y los escaladores, así como valores de potencia al LT iguales a los de los contrarrelojistas y claramente superiores a los todoterreno y los escaladores.

Sin embargo, utilizando los datos aportados por Coyle y col. (1991), Swain (1994) mostró la influencia de la relativización sobre el rendimiento ciclista. En efecto, este autor observó una correlación más estrecha entre la potencia media durante una hora de ciclismo en el laboratorio y una contrarreloj de 40 km en la carretera cuando la primera variable se expresaba en relación al exponente de la masa corporal 0,32 ($r = -0,88$ frente a $r = -0,94$, respectivamente). Esta observación le llevó a sugerir que este exponente de la masa corporal debería ser utilizado para normalizar los valores fisiológicos obtenidos en condiciones de laboratorio y predecir mejor el rendimiento en la carretera. Esta sugerencia ha sido validada por los resultados de esta investigación, ya que en relación al exponente de masa corporal 0,32, los contrarrelojistas tenían mayores valores medios de potencia máxima, potencia al OBLA y potencia al LT que los otros grupos de especialistas, incluidos los rodadores. Debido respectivamente a altos valores de potencia relativa al exponente de masa corporal 0,32 y a un ratio potencia máxima/área frontal excelente, los contrarrelojistas y los rodadores normalmente obtienen mejores resultados en competición en las contrarreloj individuales y en ciclismo de pista que los todoterreno y los escaladores.

Cabría hacer dos reseñas con respecto al rendimiento ciclista en competiciones de contrarreloj: 1) en las contrarrelojes que abren habitualmente las carreras por etapas de 3 semanas (es decir, las etapas “prólogo”), que normalmente se llevan a cabo en

terreno llano y tienen una duración de 6-15 minutos, suelen obtener mejores resultados los ciclistas que pueden ser considerados como especialistas en contrarrelojes y los rodadores. Ciclistas profesionales españoles como Induráin, Mauri, Contador y Valverde (los dos primeros están incluidos en el grupo de contrarrelojistas de este estudio) han alcanzado los puestos de cabeza en este tipo de carreras en años anteriores. Esto es indicativo de la validez como predictor del rendimiento de variables como la potencia/kg^{0,32} y la potencia/m² en etapas de contrarreloj llanas de corta duración; 2) en las etapas contrarreloj individuales más largas, durante las cuales la intensidad de ejercicio es cercana al LT (Craig y col. 1993) o al OBLA (Coyle y col. 1991, Hopkins & McKenzie 1994, Palmer y col. 1996b), los contrarrelojistas tienen una ventaja con respecto al resto de ciclistas, ya que muestran los valores más altos de potencia submáxima en relación tanto al exponente de masa corporal 0,32 como al área frontal. Esto se ve reflejado normalmente en las clasificaciones en competición. Sin embargo, es probable que las diferencias entre contrarrelojistas y todoterrenos estén más relacionadas con el hecho de que estas etapas rara vez se desarrollan en terreno llano, y que los todoterreno muchas veces no rinden a su máximo nivel posible debido a tácticas de equipo y a estrategias de carrera, más que con diferencias reales en su potencial fisiológico. Las diferencias entre los contrarrelojistas y los escaladores, por el contrario, se deben principalmente al tipo de terreno (llano o en subida) y a la resistencia del aire, ya que los ciclistas más pequeños están en desventaja cuando la resistencia que deben vencer es principalmente la del aire (en terreno llano) en lugar de la resistencia provocada por la fuerza de gravedad (en subida), debido a su ratio área frontal/masa corporal mucho mayor (Swain y col. 1987).

El ciclismo de ruta es un deporte que se desarrolla principalmente a intensidades submáximas. Como se ha indicado anteriormente, las etapas de contrarreloj individual con una duración de entre 15 y 60 minutos se corren a intensidades cercanas al OBLA. Las etapas en línea exigen a veces ascender puertos durante 30 y 90 minutos, entre tres y siete veces, también a intensidades cercanas al LT y al OBLA. Por lo tanto, la relativización de la potencia mecánica a estas intensidades submáximas parece ser también necesaria para apreciar el potencial de rendimiento durante las ascensiones de los ciclistas. Merece la pena indicar que en este estudio los contrarrelojistas obtuvieron valores de potencia al LT y de potencia al OBLA relativos a la masa corporal y al exponente de masa corporal 0,79 que el resto de especialistas, incluidos los escaladores. Estos resultados tienen su reflejo en los resultados de competición, ya que los contrarrelojistas de este estudio sobresalen repetidamente en etapas de montaña. La elección del exponente de masa corporal apropiado para la mejor predicción del rendimiento en subida es un tema controvertido. Swain (1994) sugirió que este exponente podía ser 0,79, pero afirmó que este valor no estaba tan bien establecido como el exponente de masa corporal 0,32 para el ciclismo en terreno llano. Otros autores (Svedenhag 1995) han sugerido un valor similar (0,75) para la carrera a pie, durante la cual la masa corporal tiene una gran influencia sobre el rendimiento debido a su efecto sobre la resistencia producida por la gravedad. Este también es el caso del ciclismo en subida, pero al ser la inclinación del terreno mucho mayor, el exponente de masa corporal 1 (es decir, la masa corporal) parece más apropiado a la hora de expresar tanto el consumo máximo de oxígeno como la potencia máxima (Nevill y col. 1992). En efecto, cuando se utilizó el exponente de masa corporal 1 en este estudio, los escaladores mostraron los valores más altos de potencia/kg¹ entre todos los grupos de

especialistas. Esto se ve reflejado durante la competición en la mayor capacidad de aceleración que muestran estos ciclistas en las subidas de montaña de las etapas en línea. Los grandes rendimientos que logran habitualmente los escaladores en las cronoescaladas podrían también explicarse por sus altos valores de potencia al LT/kg y potencia al OBLA/kg, muy similares a los de los contrarrelojistas. Estas observaciones indican que los escaladores y los contrarrelojistas tienen una capacidad similar durante las subidas, lo cual se ve corroborado al analizar los resultados de las etapas de montaña en las grandes vueltas por etapas de tres semanas de los últimos años, en las que ciclistas pequeños y ligeros (por ejemplo Joaquín Rodríguez, Cunego y Contador) han compartido las posiciones de cabeza con ciclistas más grandes y pesados (por ejemplo Wiggins, Evans y Nibali).

La relativización de las capacidades fisiológicas indica que los contrarrelojistas tienen una ventaja general de rendimiento en comparación con los otros grupos de especialistas, es decir, rodadores, todoterrenos y escaladores. Sin embargo, la mayoría de las diferencias entre grupos no alcanzaron el nivel de significatividad estadística. Esta observación lleva a las siguientes consideraciones sobre el rendimiento deportivo en general y el rendimiento en el ciclismo de ruta en particular: 1) el rendimiento en un evento singular que depende de una multitud de variables y circunstancias. Por lo tanto, además de las características fisiológicas y morfológicas discutidas anteriormente, el rendimiento en ciclismo de ruta viene también determinado por otras variables, tales como la capacidad de termorregulación, de recuperación, psicología del ciclista, el estado de salud o la estrategia de carrera, que no han sido estudiados en esta investigación; 2) las carreras por etapas de tres semanas normalmente se ganan o se

pierden por diferencias de tiempo que varían entre los 200 y los 400 segundos, lo cual representa un 0,07-0,13 % de un tiempo total de unos 300.000 segundos. Dada su influencia en la clasificación final en la competición, estas diferencias que no son significativas desde un punto de vista estadístico, tienen una gran importancia desde un punto de vista deportivo.

6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Las tres investigaciones experimentales que componen esta tesis doctoral han dado respuesta a los objetivos generales presentados anteriormente, es decir,

1. Se ha determinado la validez de la intensidad de ejercicio OBLA como método para evaluar la capacidad de resistencia de ciclistas de ruta jóvenes de competición, mediante el análisis de sus respuestas metabólicas y cardiorrespiratorias durante un ejercicio submáximo de 30 minutos a dicha intensidad (Estudio I).

2. Se ha verificado la validez de un test de velódromo para estudiar las características fisiológicas de ciclistas de ruta amateur de competición, y se han determinado las relaciones entre el rendimiento ciclista en el velódromo y los parámetros fisiológicos medidos en el laboratorio (Estudio II).

3. Se ha analizado la precisión de diferentes ecuaciones aportadas en la literatura para la estimación del costo metabólico del ciclismo (Estudio II).

4. Se han correlacionado las capacidades fisiológicas y el rendimiento de ciclistas de ruta profesionales, en relación con su especialidad en carreras por etapas, dependiente de su morfotipo (Estudio III).

En el estudio I:

Se ha determinado que la intensidad de ejercicio referenciada a una [La] fija puede servir para grandes grupos pero no para ciclistas de ruta jóvenes de competición. Deberían prevalecer los estudios individualizados para determinar la resistencia aeróbica. El MLSS puede ser el método más preciso pero requiere 3 o 4 pruebas. El ILT proporciona información de manera más rápida y es una muy buena aproximación al MLSS sobre todo para ciclistas de ruta de competición (Jones & Doust 1998).



En el estudio II:

Los resultados obtenidos durante el test de velódromo por medio de la ecuación propuesta por di Prampero y col. (1979) indicaron que el test de velódromo utilizado en el Estudio II es un método válido para estimar parámetros aeróbicos máximos de ciclistas de ruta amateur de competición.

Este tipo de protocolo presenta la ventaja de evaluar al ciclista en condiciones más reales y específicas a su deporte que en el laboratorio. La elección de la ecuación de estimación que debe ser utilizada debería realizarse en función del tipo de equipamiento ciclista utilizado. Debido a la interacción observada entre la potencia aeróbica, las dimensiones corporales y el rendimiento, cuando se lleva a cabo la evaluación en ciclistas de ruta de competición en el laboratorio los valores deberían expresarse por unidad de área de superficie corporal o de masa corporal, con el fin de predecir con mayor precisión el nivel de rendimiento del ciclista en condiciones de campo específicas.



En el estudio III:

La relativización de las capacidades fisiológicas indicó que los contrarrelojistas tienen una ventaja general para el rendimiento sobre los otros grupos de especialistas en todos los tipos de terrenos (es decir, en llano o en subida) y en todas las condiciones de competición (es decir, individualmente o en pelotón).

Se han sugerido los exponentes de masa corporal 0,32 y 1 para evaluar la capacidad del ciclista en llano y en subida, respectivamente.

Se han recomendado los valores absolutos de potencia máxima para predecir el rendimiento en eventos cortos en terreno llano, tales como las etapas-prólogo iniciales.

Los valores al LT y al OBLA parecen ser más apropiados para predecir el rendimiento en eventos de contrarreloj más largos y en las subidas de montaña ciclistas.

Estos resultados han tenido su reflejo en los resultados de competición, ya que los contrarrelojistas de este estudio sobresalen repetidamente en etapas de montaña.

Los grandes rendimientos que logran habitualmente los escaladores en las cronoescaladas pueden explicarse por sus altos valores de potencia al LT/kg y potencia al OBLA/kg, muy similares a los de los contrarrelojistas.

Con posterioridad a la realización de este estudio han aparecido trabajos similares al nuestro en el que se corroboran las observaciones aquí presentadas (Lucia y col. 2000, Impellizzeri y col. 2008, Earnest y col. 2009).

8. BIBLIOGRAFÍA

Aagard P, Andersen JL, Bennekou M, Larsson B, Olesen JL, Crameri R, Magnusson SP, and Kjaer M. (2011) Effects of resistance training on endurance capacity and muscle fiber composition in young top-level cyclists. *Scand J Med Sci Sports* Dec; 21(6): 298-307.

Abiss CR, and Laursen PB. (2005) Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Medicine*, 35, 865-898.

Adams WC, and Seabury JJ. (1976) The relationship between energy expenditure and riding speed in outdoor cycling. *Med Sci Sports Exerc* 8: 51.

Adlercreutz H, Harkonen M, Kuoppasalmi K, Naveri H, Huhtaniemi I, Tikkanen H, Remes K, Dessypris A, and Karvonen J. (1986) Effect of training on plasma anabolic and catabolic steroid hormones and their response during physical exercise. *Int J Sports Med* 7 Suppl 1: 27-28.

Allen H, and Coggan A. (2010) Training and Racing with a Power Meter. *Velo Press*. April 26.

Åstrand PO. (1970) Work tests with the bicycle ergometer. Varberg: *Monark-Crescent AB*.

Banister EW. Modeling elite athletic performance. (1991) In: Green HJ, McDougal JD, Wenger H, editors. Physiological testing of elite athletes. *Champaign (IL): Human Kinetics*: 403-424.

Baron B, Dekerle J, Robin S, Nevriere R, Dupont L, Matran R, Vanvelcenaher J, Robin H, and Pelayo P. (2003) Maximal lactate steady state does not correspond to a complete physiological steady state. *Int J Sports Med* 24: 582-587.

Bastiaans JJ, Van Diemen AB, Veneberg T, and Jeukendrup AE. (2001) The effects of replacing a portion of endurance training by explosive strength training on performance in trained cyclists. *Eur J App Physiol* 86: 79-84.

Beneke R, Hutler M, and Leithauser RM. (2000) Maximal lactate-steady-state independent of performance. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1135-1139.

Beneke R. (2003) Maximal lactate steady-state concentration (MLSS): experimental and modelling approaches. *Eur J App Physiol* 88: 361-369.

Billat VL, Sirvent P, Py G, Koralstein JP, and Mercier J. (2003) The concept of maximal lactate steady state a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Med* 33: 407-426.

Bosquet L, Leger L, and Legros P. (2001) Blood lactate response to overtraining in male endurance athletes. *Eur J Appl Physiol* 84: 107-114.

Bosquet L, Leger L, and Legros P. (2002) Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med* 32: 675-700.

Bosquet L, Merkari S, Arvisais D, and Aubert AE. (2008) Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *British J Sports Med* 42: 709-714.

Brickley G, Doust J, and Williams CA. (2002) Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. *Eur J Appl Physiol* 88: 146-151.

Candotti CT, Ribeiro J, Soares DP, Reischak A, Fagundes J, and Guimaraes AC. (2007). Effective force and economy of triathletes and cyclists. *Sports Biomech* 6 (1): 31-43.

Coast JR and Welch HG. (1985) Linear increases in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol* 53: 339-342.

Conconi F, Borsetto C, Casoni I, and Ferrari M. (1988) Noninvasive determination of the anaerobic threshold in cyclists. In : Burke E.R., Newsom M.M. (Eds.) : Medical and Scientific Aspects of Cycling. Champaign, IL, *Human Kinetics Books*, 79-91.

Costill DL, Flynn MG, Kirwan JP, Houmard JA, Mitchell JB, Thomas R, and Park SH. (1988) Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med Sci Sports Exerc* 20: 249-254.

Coutts AJ, Slattery KM, and Wallace LK. (2007) Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes. *J Sci Med Sport / Sports Med Australia* 10: 372-381.

Coyle EF, Coggan AR, Hopper MK, and Walters TJ. (1988) Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol* 64: 2622–2630.

Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, Abraham LD, and Petrek GW. (1991) Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 23: 93–107.

Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF, and Beltz JD. (1992) Cycling efficiency is related to percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24: 782-788.

Coyle EF. (2005) Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of applied physiology*, 98, 2191–2196.

Craig NP, Norton KI, Bourdon PC, Woolford SM, Stanef T, Squires B, Olds TS, Conyers RA, and Walsh CB. (1993) Aerobic and anaerobic indices contributing to track endurance cycling performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 67 (2): 150-158.

Davies CT. (1980) Effect of air resistance on the metabolic cost and performance of cycling. *Eur J Appl Physiol* 45: 245-254.

Davies CT, and White MJ. (1982) Muscle weakness following dynamic exercise in humans. *J Appl Physiol*. Jul; 53(1): 236-241.

Dekerle J, Baron B, Dupont L, Vanvelcenaher J, and Pelayo P. (2003) Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *Eur J Appl Physiol* 89: 281-288.

di Prampero, PE, Cortilli G, Mognoni P, and Saibene F. (1979) Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 47: 201-206.

Du Bois D, and Du Bois EF. (1916) Clinical calorimeter. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med* 17: 863-871.

Dumke CL, Brock DW, Helms BH, and Haff GG. (2006) Heart rate at lactate threshold and cycling time trials. *J Strength Cond Res*. 20(3): 601-607.

Dupuy O, Renaud M, Bherer L, and Bosquet L. (2010) Effect of functional overreaching on executive functions. *Int J Sports Med* 31: 617-623.

Dupuy O, Lussier M, Fraser S, Bherer L, Audiffren M, and Bosquet L. (2012) Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports* Apr. 27; 24(1):234-242.

Earnest CP, Foster C, Hoyos J, Muniesa CA, Santalla A, and Lucia A. (2009) Time trial exertion traits of cycling's Grand Tours. *Int J Sports Med* Apr; 30(4): 240-244.

Emanuele U, and Denoth J. (2012) Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur J Appl Physiol* 112(7): 2433-2441.

Faria EW, Parker DL, and Faria IE. (2005a) The Science of Cycling Factors Affecting Performance. *Sports Med* 35 (4): 313-337.

Faria EW, Parker DL, and Faria IE. (2005b) The Science of Cycling Physiology and Training. *Sports Med.* 35 (4): 285-312.

Faria IE, Faria EW, Roberts S, and Yoshimura D (1989) Comparison of physical and physiological characteristics in elite young and mature cyclists. *Res Q* 60: 388-395.

Faria IE. (1992) Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. An update. *Sports Med.* Jul; 14(1): 43-63.

Fernández-García B, Pérez-Landaluce J, Rodríguez-Alonso M, and Terrados N. (2000) Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc* 32 (5): 1002-1006.

Figueira TR, Caputo F, Pelarigo JG, and Denadai BS. (2008) Influence of exercise mode and maximal lactate-steady-state concentration on the validity of OBLA to predict maximal lactate-steady-state in active individuals. *J Sci Med Sport* 11: 280-286.

Firth MS. (1981) A sport-specific training and testing device for racing cyclists. *Ergonomics* 24: 565-571.

Föhrenbach R, Mader A, and Hollmann W. (1987) Determination of endurance capacity and prediction of exercise intensities for training and competition in marathon runners. *Int J Sports Med* 8: 11-18.

Fry RW, Morton AR, Garcia-Webb P, Crawford GP, and Keast D. (1992) Biological responses to overload training in endurance sports. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64: 335-344.

García-López J, Ogueta-Alday A, Larrazabal J, and Rodríguez-Marroyo JA. (2014) The Use of velodrome tests to evaluate aerodynamic drag in professional cyclists. *Int J Sports Med* 35(5): 451-455.

García-López J, Díez-Leal S, A, Rodríguez-Marroyo JA, Larrazabal J, Glez Galdeano I, and Villa JG. (2009) Eficiencia mecánica de pedaleo en ciclistas de diferente nivel competitivo. *Biomecánica* 17(2): 9-20.

Geysant A, Dormois D, Barthelemy JC, and Lacour JR. (1985) Lactate determination with the lactate analyzer LA 640: a critical study. *Scand J Clin Lab Invest* 45: 145-149.

Gladden LB. (2004) Lactate Metabolism: a new paradigm for the third millennium. *J Physiol* 558(1); 5-30.

González-Haro C, Galilea Ballarini PA, Soria M, Drobic F, and Escanero JF. (2007) Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *Br J Sports Med*. 41(8): 506-509.

González-Haro C, Galilea PA, and Escanero JF. (2008) Comparison of different theoretical models estimating peak power output and maximal oxygen uptake in trained and elite triathletes and endurance cyclists in the velodrome. *J Sports Sci*. 26(6): 591-601.

Gross AC, Kyle CR, and Malewicki DJ. (1983) The aerodynamics of human-powered land vehicles. *Sc American* 249: 142-152.

Hagberg JM, Mullin JP, Giese MD, and Spitznagel E. (1981) Effect of pedalling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J Appl Physiol* 51: 447-451

Hagberg JM, and Coyle EF. (1983) Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc* 15: 287-289.

Halson SL, and Jeukendrup AE. (2004) Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports Med* 34: 967-981.

Hansen EA, Adersen JL, Nielsen JS, and Sjogaard G. (2002) Muscle fibre type, efficiency, and mechanical optima affect freely chosen pedal rate during cycling. *Acta Physiol Scand* 176: 185-194.

Hansen EA, and Waldeland H. (2008) Seated versus standing position for maximization of performance during intense uphill cycling. *J Sports Sci* 26(9): 977-984.

Harnish C, King D, and Swensen T. (2007) Effect of cycling position on oxygen uptake and preferred cadence in trained cyclists during hill climbing at various power outputs. *Eur J Appl Physiol* 99(4): 387-391.

Hawley JA, and Noakes TD. (1992) Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65(1): 79-83.

Heck H, Mader A, Hess G, Mucke S, Muller R, and Hollmann W. (1985) Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med* 6: 117-130.

Hedelin R, Kentta G, Wiklund U, Bjerle P, and Henriksson-Larsen K. (2000) Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1480-1484.

Hopker J, Coleman D, and Passfield L. (2009) Changes in cycling efficiency during a competitive season. *Med Sci Sports Exerc* 41(4): 912-919.

Hopker J, and Jobson S. (2013) Performance Cycling: The Science of Success. ED. *Bloomsbury Sport. A&C Black*. London.. ISBN: 9781408196472

Hopkins SR, and McKenzie DC. (1994) The laboratory assessment of endurance performance in cyclists. *Can J Appl Physiol Sep*; 19(3): 266-274.

Hynynen E, Uusitalo A, Kontinen N, and Rusko H. (2008) Cardiac autonomic responses to standing up and cognitive task in overtrained athletes. *Int J Sports Med* 29: 552-558.

Ice RG, Millman PL, Ice DC, and Camp JC. (1988) A physiological profile of the 1984-1986 race across America winner. In: *Medical and Scientific Aspects of Cycling*. E.R. Burke and M.M. Newsom (EDs) *Champaign, IL: Human Kinetics*, pp. 173-180.

Impellizzeri FM, Ebert T, Sassi A, Menaspà P, Rampinini E, and Martin DT. (2008) Level ground and uphill cycling ability in elite female mountain bikers and road cyclists. *Eur J Appl Physiol Feb*; 102(3): 335-341.

Ivy JL, Withers RT, Van Handel PJ, Elger DH, and Costill DL. (1980) Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J Appl Physiol* 48: 523-527.

Jenkins DG, and Quigley BM. (1990) Blood lactate in trained cyclist during cycle ergometry at critical power. *Eur J Appl Physiol* 61(3-4): 278-283.

Jeukendrup AE, Hesselink MK, Snyder AC, Kuipers H, and Keizer HA. (1992) Physiological changes in male competitive cyclists after two weeks of intensified training. *Int J Sports Med* 13: 534-541.

Jones AM, and Doust JH. (1998) The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1304-1313.

Joyner MJ, and Coyle EF. (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol* 586.1: 35–44.

Karsten B, Jobson SA, Hopker J, Jimenez A, and Beedie C. (2014) High Agreement between Laboratory and Field Estimates of Critical Power in Cycling. *Int J Sports Med* 35(4): 298-303.

Kilding AE, and Jones AM. (2005) Validity of a single-visit protocol to estimate the maximum lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc* 37: 1734-1740.

Kindermann W, Simon G, and Keul J. (1979) The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 42: 25–34.

Kuipers H, Verstappen FT, Keizer HA, Geurten P, and van Kranenburg G. (1985) Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *Int J Sports Med* Aug; 6(4): 197-201.

Lac G, and Maso F. (2004) Biological markers for the follow-up of athletes throughout the training season. *Pathol Biol* 52: 43–49.

Lacour JR, Padilla S, et Denis C. (1987) L'inflexion de la courbe fréquence cardiaque: puissance n'est pas un témoin du deuil anaérobie. *Sci. Motr.* 1: 3-6.

La Voie MF, Mercer TH, and Ciolfi MA. (1988) VO₂max of competitive cyclists using a conventional cycle ergometer tests versus a sport-specific bicycle test. In: Burke E.R., Newsom M.M. (Eds.) : Medical and Scientific Aspects of Cycling. Champaign, IL, *Human Kinetics Books*, 141-145

La Fontaine TP, Londeree BR, and Spath WK. (1981) The maximal steady state versus selected running events. *Med Sci Sports Exerc* 13: 190-193.

Lee H, Martin DT, Anson JM, Grundy D, and Hahn AG. (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *J Sports Sci*. Dec 20(12):1001-1008.

Lehmann M, Dickhuth HH, Gendrich G, Lazar W, Thum M, Kaminski R, Aramendi JF, Peterke E, Wieland W, and Keul J. (1991) Training-overtraining. A prospective, experimental study with experienced middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med* 12: 444-452.

Lehmann M, Baumgartl P, Wiesenack C, Seidel A, Baumann H, Fischer S, Spori U, Gendrich G, Kaminski R, and Keul J. (1992) Training-overtraining: influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamines and some metabolic parameters in experienced middle- and long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64: 169-177.

Lehmann M, Mann H, Gastmann U, Keul J, Vetter D, Steinacker JM, and Haussinger D. (1996) Unaccustomed high-mileage vs intensity training-related changes in performance and serum amino acid levels. *Int J Sports Med* 17: 187-191.

Le Meur Y, Hausswirth C, Natta F, Couturier A, Bignet F, and Vidal PP. (2013) A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *J Appl Physiol* Feb; 114(3): 411-420.

Lindsay FH, Hawley JA, Myburgh KH, Schomer HH, Noakes TD, and Dennis SC. (1996) Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med Sci Sports Exerc* Nov; 28(11): 1427-1434.

Lucia L, Pardo J, Durántez A, Hoyos, J. and Chicharro JL. (1998) Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J SportsMed*; 19: 342-348.

Lucia L, Hoyos J, Carvajal A, and Chicharro JL. (1999) Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *Int J Sports Med*; 20: 167-172.

Lucia A, Hoyos J, and Chicharro JL. (2000) Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med*. Oct; 21(7): 505-512.

Lucia L, Hoyos J, Pérez M, Santalla A, and Chicharro JL. (2002) Inverse relationship between VO_{2max} and economy/efficiency in world-class cyclists *Med Sci Sports Exerc*; 34(12): 2079-2084.

Lucia L, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, and Chicharro JL. (2003) Tour de France versus Vuelta a España: which is harder ? *Med Sci Sports Exerc*; 35(5): 872-878.

Mackinnon LT, Hooper SL, Jones S, Gordon RD, and Bachmann AW. (1997) Hormonal, immunological, and hematological responses to intensified training in elite swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1637-1645.

Mader A, and Heck H. (1986) A theory of the metabolic origin of anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 7: 46-65.

Marion GA, and Léger LA. (1988) Energetics of indoor track cycling in trained competitors. *Int J Sports Med* 9: 234-239.

McArdle WD, Katch FI, and Katch VL. (1986) Exercise Physiology: Energy, Nutrition and Human Performance. 2nd ed. Lea and Febiger, Philadelphia, p. 139.

McCole SD, Claney K, Conte C, Anderson R, and Hagberg JM. (1990) Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol* 68: 748-753.

Millet GP, Tronche C, Fuster N, and Candau R. (2002) Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Med Sci Sports Exerc.* 34(10): 1645-1652.

Millet GP, Tronche C, Grappe F. (2014) Estimating power output from uphill performance in cycling: Is it really accurate. *Int J Sports Physiol Perform* 9(5): 777-782.

Mujika I, Chatard JC, Padilla S, Guezennec CY, and Geysant A. (1996). Hormonal responses to training and its tapering off in competitive swimmers: relationships with performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 74(4):361-6.

Mujika I, and Padilla S. (2001) Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med*; 31 (7): 479-487.

Mujika I. (2012) The cycling physiology of Miguel Induráin 14 years after retirement. *Int J Sports Physiol Perform* 7(4): 397-400.

Nederhof E, Lemmink KA, Visscher C, Meeusen R, and Mulder T. (2006) Psychomotor speed: possibly a new marker for overtraining syndrome. *Sports Med* 36: 817-828.

Nederhof E, Lemmink K, Zwerver J, and Mulder T. (2007) The effect of high load training on psychomotor speed. *Int J Sports Med* 28: 595-601.

Neumann DA, Cook TM, Sholty RL, and Sobush DC. (1992) An electromyographic analysis of hip abductor muscle activity when subjects are carrying loads in one or both hands. *Phys Ther* Mar; 72(3): 207-217.

Nevill AM, Ramsbottom R, and Williams C. (1992) Scaling physiological measurements for individuals of different body size. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65 (2): 110-117.

Nimmerichter A, Prinz B, Haselsberger K, Novak N, Simon D, and Hopker JG. (2015) Gross efficiency during flat and uphill cycling in field conditions. *Int J Sports Physiol Perform*. In press.

Noakes TD, Myburgh KH, du Plessis J, Lang L, Lambert M, van der Riet C, and Schall R. (1991) Metabolic rate, not percent dehydration, predicts rectal temperature in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc*. Apr; 23 (4): 443-449.

Olds TS, Norton KI, and Craig NP. (1993) Mathematical model of cycling performance. *J Appl Physiol* 75: 730–737.

Olds TS, Norton KI, Lowe ELA, Olive S, Reay F, and Ly S. (1995) Modeling road cycling performance. *J Appl Physiol* 78: 1596– 1611.

Oosthuysen T, Viedge A, McVeigh J, and Avidon I. (2013) Anaerobic power in road cyclists is improved after 10 weeks of whole-body vibration training. *J Strength Cond Res* 27(2): 485-494.

Padilla S, Mujika I, Cuesta G, Polo JM, and Chatard JC. (1996) Validity of a velodrome test for competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 73: 446–451.

Padilla S, Mujika I, Cuesta G, and Goiriena JJ. (1999) Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 31: 878-885.

Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, and Angulo F. (2000) Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 32: 850-856.

Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Santisteban JM, Angulo F, and Goiriena JJ. (2001) Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 33(5): 796-802.

Padilla S, Mujika I, Santisteban J, Impellizzeri FM, and Goiriena JJ. (2008) Exercise intensity and load during uphill cycling in professional 3-week races. *Eur J Appl Physiol* 102(4): 431-438.

Palmer GS, Hawley JA, Dennis SC, and Noakes TD. (1994) Heart rate responses during a 4-d cycle stage race. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1278-1283.

Palmer GS, Dennis SC, Noakes TD, and Hawley JA. (1996a). Assessment of the reproducibility of performance testing on an air-braked cycle ergometer. *Int J Sports Med* 17: 293–298.

Palmer GS, Noakes TD, and Hawley JA. (1997). Effect of steady state versus stochastic exercise on subsequent cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 29(5): 684–687.

Palmer GS, Martin DT, McLean BD, Bannan S, Lee H, Craig NP, and Hawley JA. (2000) Heart rate does not accurately reflect power output during professional cycling competition [abstract]. *Med Sci Sports Exerc* 32(5) Suppl. Abstract 1448: .

Peronnet F, Bouissou P, Perrault H, and Ricci J. (1989) Comparaison du record de l'heure cycliste selon l'altitude et le matériel utilisé. *Can J Sport Sci* 14: 93-98.

Pinot J, and Grappe F. (2015) A six-year monitoring case study of a top-10 cycling Gran Tour finisher. *J Sport Sci* 33(9): 907-914.

Pugh LG. (1974) The relation of oxygen intake and speed in competition cycling and comparative observations on the bicycle ergometer. *J Physiol Lond* 241: 795-808.

Robergs RA. (2014) A critical review of the history of low- to moderate-intensity steady-state VO₂ kinetics. *Sports Med*. May;44(5):641-653

Rønnestad BR, and Mujika I. (2014) Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: a review. *Scand J Med Sci Sports* Aug; 24(4): 603-612.

Saltin B, Kim CK, Terrados N, Larsen H, Svedenhag J, and Rolf CJ. (1995) Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* Aug; 5(4): 222-230.

Santalla A, Earnest CP, Marroyo JA, and Lucia A (2012) The Tour de France: an updated physiological review. *Int J Sports Physiol Perform* 7(3): 200-209.

Sayers MG, Tweddle AL, Every J, and Wiegand A. (2012) Changes in drive phase lower limb kinematics during a 60 min cycling time trial. *J Sci Med Sport* 15(2): 169-174.

Seifert JG, and Langenfeld ME (1988) The use of windload simulators for VO_{2max} determination and bicycling research. In: Burke E.R., Newsom M.M. (Eds.) : Medical and Scientific Aspects of Cycling. Champaign, IL, *Human Kinetics Books*, 117-120.

Siedlik JA, Harrison G, Brigman R, Graham ZA, Weir JP, Gallagher PM, and Vardiman JP. (2015) Methods comparison: Assessing agreement of physiological parameters obtained from exercise on two different cycle ergometers. *J Strength Cond Res* 29(4): 1139-1145.

Simões HG, Hiyane WC, Sotero RC, Pardono E, Puga GM, Lima LC, and Campbell CS. (2009) Polynomial modeling for the identification of lactate minimum velocity by different methods. *J Sports Med Phys Fitness* 49(1): 14-18.

Sjödin B, and Jacobs I. (1981) Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med* 2: 23-26.

Sjödin B, and Svedenhag J. (1985) Applied physiology of marathon running. *Sports Med* 2: 83-99.

Sjøgaard G. (1984) Muscle morphology and metabolic potential in elite road racing cyclist during a season. *Int J Sports Med* 5: 250-254.

Snyder AC, Kuipers H, Cheng B, Servais R, and Franssen E. (1995) Overtraining following intensified training with normal muscle glycogen. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1063-1070.

Stegmann H, and Kindermann W. (1982) Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol.l(-1) lactate. *Int J Sports Med* 3: 105-110.

Svedenhag J, and Sjödén B. (1994) Body-mass-modified running economy and step length in elite male middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med* Aug; 15(6): 305-310.

Svedenhag J. (1995) Maximal and submaximal oxygen uptake during running: how should body mass be accounted for? *Scand J Med Sci Sports* Aug; 5(4): 175-180.

Swain DP, Coast JR, Clifford PS, Milliken MC, and Stray-Gundersen J. (1987) Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 62: 668-672.

Swain DP. The influence of body mass in endurance bicycling. (1994) *Med Sci Sports Exerc* 26: 58-63.

Tanaka K, Matsuura Y, Kumagai S, Matsuzaka A, Hirakoba K, and Asano K. (1983) Relationships of anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation with endurance performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 52(1): 51-56.

Tanaka K, and Matsuura Y. (1984) Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol* 57: 640-643.

Terrados N, Melichna J, Sylvén C, Jansson E, and Kaijser L. (1988) Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 57(2): 203-209.

Tokmakidis SP, Leger LA, and Piliandis TC. (1998) Failure to obtain a unique threshold on the blood lactate concentration curve during exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 77: 333-342.

Tremblay MS, Copeland JL, and Van Helder W (2004). Effect of training status and exercise mode on endogenous steroid hormones in men. *J Appl Physiol* 96(2): 531-9.

Trump ME, Heigenhauser GJ, Putman CT, and Spriet LL. (1996). Importance of muscle phosphocreatine during intermittent maximal cycling. *J Appl Physiol* 80(5): 1574-1580.

Urhausen A, Gabriel HH, Weiler B, and Kindermann W. (1998a) Ergometric and psychological findings during overtraining: a long-term follow-up study in endurance athletes. *Int J Sports Med* 19: 114-120.

Urhausen A, Gabriel HH, and Kindermann W. (1998b) Impaired pituitary hormonal response to exhaustive exercise in overtrained endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc* 30: 407-414.

Uusitalo AL, Huttunen P, Hanin Y, Uusitalo AJ, and Rusko HK. (1998) Hormonal responses to endurance training and overtraining in female athletes. *Clin J Sport Med* 8: 178-186.

Van Baak MA, and Binkhorst RA. (1981) Oxygen consumption during outdoor recreational cycling. *Ergonomics* 24: 725-733.

Van Handel PJ, Baldwin C, Phul J, Katz A, Dantine S, and Bradley PW. (1988) Measurement and interpretation of physiological parameters associated with cycling performance. In: Burke E.R., Newsom M.M. (Eds.) : Medical and Scientific Aspects of Cycling. Champaign, IL, *Human Kinetics Books*, 47-72.

Van Schuytender R, Eynde BV, and Hespel P. (2004) Prediction of sprint triathlon performance from laboratory tests. *Eur J Appl Physiol* 91: 94-99.

Vercruyssen F, and Brisswalter J. (2010) Which factors determine the freely chosen cadence during submaximal cycling ? *J Sci Med Sport* Mar 13(2): 225-231.

Vogt S, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A, and Heinrich L. (2007) Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: a case study. *J Sports Sci* 25(12): 1299-1305.

Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, and Beaver WL. (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35: 236-243.

Wilber RL, Zawadzki KM, Kearney JT, Shannon MP, and Disalvo D. (1997) Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* Aug; 29(8): 1090-1094.

Whipp JV. (1974) Letters to the editor. *Science* Apr 12; 184(4133): 116.

Yamamoto LM, Klau JF, Casa DJ, Kraemer WJ, Armstrong LE, and Maresh CM. (2010) The effects of resistance training on road cycling performance among highly trained cyclists: A systematic review. *J Strength Cond Res* Feb; 24(2): 560-566.

Yoshida T. (1984) Effect of exercise duration on the determination of the anaerobic threshold and the onset of blood lactate accumulation. *Eur J Appl Physiol* 53: 196-199.

